



UNIVERSITÉ DE L'ALGARVE

Faculté d'Économie

en partenariat avec

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE LEIRIA

L'optimisation du processus de fraisage dans l'Industrie Portugaise des Moules et sa contribution pour la durabilité de l'entreprise et de l'environnement

Filipe André da Silva Narciso

Dissertation

Maitrise en Gestion d'Entreprise

Travail effectué avec l'orientation de

Professeure Docteur Susana Cristina Serrano Fernandes Rodrigues

Décembre de 2012

L'optimisation du processus de fraisage dans l'Industrie Portugaise des Moules et sa contribution pour la durabilité de l'entreprise et de l'environnement

Je déclare être l'auteur de ce travail, qui est original et inédit.
Les auteurs et les œuvres consultées ont été dûment cités sur le texte et sont mentionnés sur la liste de références incluse.

(Filipe Narciso)

L'Université de l'Algarve et l'École Polytechnique de Leiria ont le droit, perpétuel et sans frontières géographiques, d'archiver et faire connaître ce travail à travers des exemplaires imprimés reproduits en papier ou sous forme digitale, ou par quelconque autre moyen connu ou qui vienne à être inventé, de le diffuser à travers des répertoires scientifiques et d'admettre sa copie et distribution avec des objectifs éducatifs ou d'investigation, non commerciaux, à condition qu'il soit donné le crédit à l'auteur et à l'éditeur.

“Nous devons apprendre à vivre tous comme des frères ou nous mourrons tous comme des fous.”

Martin Luther King

A tous ceux qui me soutiennent,
respectent et donnent un sens à ma vie.

Remerciements

En ce moment je ne peux que remercier mon Professeur, Susana Rodrigues pour son accompagnement et disponibilité pendant tous les moments, même ceux où tout paraissait impossible.

Je remercie également la Faculté d'Économie de l'Université de l'Algarve, qui m'a reçu comme élève et, spécialement tous les professeurs qui ont enseigné au long de cette maîtrise, investissant leur temps et effort pour le partage du savoir et à l'École Supérieur de Technologie et Gestion de l'Institut Polytechnique de Leiria, en partenariat établi avec la Faculté d'Économie de l'Université de l'Algarve.

Je voudrai également exprimer ma gratitude à l'entreprise où a été développé l'étude, spécialement aux personnes avec qui j'ai contacté directement, pour leur attention, temps et suggestions et pour la forme comme ils ont confié en moi, me fournissant toute l'information nécessaire.

Finalement, mais non moins important, je remercie la solidarité et la confiance de ma famille, importante pour la réalisation de ce projet et, en particulier ma compagne, Elisa Nazário, pour son affection, son soutien et encouragement en tout moment, surtout les plus difficiles.

Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne mentionnais pas mes amis, eux aussi fondamentaux, pour le soutien, encouragement et confiance qu'ils ont déposés en moi et dans mes compétences et à tous ceux qui, de certaine manière, ont confié en moi et en mon travail, contribuant avec suggestions et soutien.

ABSTRACT

This research aims at optimizing the production process during the milling stage in the Portuguese Moulds Industry (IPM) for the plastic injection, through the use of a new form of milling (increased lateral and axial increment of the tool) that contribute to the sustainability of the company (energy saving, machine-saving hours) and to reducing their environmental impact (reduction of carbon dioxide emissions). Thus, the adoption of a new milling strategy will contribute to the company's competitiveness through the optimized use of energy resources and of skilled labour, as well as reduce carbon dioxide emissions (CO₂).

During the study was analyzed secondary information in order to contextualize and understand the IPM, in particular one of the stages of its production process – milling. In this way, the study took place in a company situated in Marinha Grande (Portugal) and focuses on the moulds produced by the same company in 2010. From a stratified random probability sample, justified by the tonnage diversity of the moulds and by the representativeness of the results, simulations of two milling strategies were carried out (a commonly used – conventional – and proposed – sustainable) in order to measure the times resulting from simulations. Thus, by the obtained results was possible the comparative analysis of figures relative to the man-machine hours, the energy consumption and carbon dioxide emissions (CO₂).

The results, obtained from the measurement of time relative to the two milling simulations (conventional and sustainable), show a significant reduction in simulation times (more than 2 months useful work) when opting for sustainable milling, which is reflected in the man-machine hours required, energy consumption and carbon dioxide emissions (CO₂). Moreover, these immediate gains are accompanied by the possibility of meeting the deadlines stipulated with clients, produce more moulds with the same resources and reduce environmental impact, increasing the company's competitiveness and improving its image among stakeholders. Thus, the optimization of the milling process and the consequent reduction in time used, is important for the economic use of resources and energy, contributing to the competitive potential of the company and its environmental sustainability.

Keywords: milling; optimization of the production process; moulds industry; sustentability.

RESUMÉ

Cette recherche vise étudier l'optimisation du processus productif pendant la phase de fraisage de l'Industrie Portugaise des Moules (IPM) pour l'injection de plastique à travers l'utilisation d'une nouvelle forme de fraisage (augmentation de l'incrément latéral et axial de l'outil) qui contribuera pour que l'entreprise soit durable (économie énergétique, économie d'heures-machine) et pour la diminution de son impact environnemental (réduction de l'émission de dioxyde de carbone). Ainsi, l'adoption d'un nouveau processus de fraisage contribuera pour la compétitivité de l'entreprise à travers l'utilisation optimale des ressources énergétiques et de main d'œuvre, ainsi comme pour la diminution des émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

Pendant l'étude l'information secondaire a été analysée pour la contextualisation et compréhension de l'IPM, notamment d'une des phases du processus productif – le fraisage. Ainsi, l'étude se déroule dans une entreprise de “Marinha Grande” (Portugal) et se reflète sur les moules produits par celle-ci en 2010. Partant d'un échantillon probabiliste aléatoire stratifié, justifié par la diversité de tonnage des moules et par la représentativité des résultats, nous avons réalisé des simulations à travers l'utilisation du logiciel *WorkNc*, utilisant deux stratégies d'usinage (celle habituellement utilisée-conventionnelle - et la proposée - durable) avec l'intention de mesurer les temps résultants des simulations. Ainsi, nous avons obtenu des résultats qui ont rendu possible l'analyse comparative des valeurs relativement aux heures homme-machine, aux consommations d'énergie et aux émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

Les résultats, obtenus à partir de la mesure des temps des simulations relatives aux deux fraisages (conventionnels et durables), montrent une réduction significative dans les temps de simulation (plus de deux mois ouvrables de travail) quand nous optons par le fraisage durable, ce qui se reflète dans les heures nécessaires d'homme-machine, dans la consommation énergétique et dans l'émission de dioxyde de carbone (CO₂). D'un autre côté, ces gains immédiats sont accompagnés par la possibilité de satisfaire les délais établis avec les clientes, produire plus de moules avec les mêmes ressources et diminuer l'impact environnemental augmentant la compétitivité de l'entreprise et améliorant son image auprès des *stakeholders*. Ainsi, l'optimisation du processus de fraisage et la conséquente diminution des temps utilisés é importante parce qu'elle permet une

économie de l'utilisation des ressources humaines et énergétiques, contribuant pour le potentiel compétitif de l'entreprise et pour sa durabilité environnemental.

Mots-clefs: fraisage, optimisation du processus productif, industrie des moules, durabilité.

Liste de Figures

Figure 1 – Balance commerciale du secteur entre 2006-2010	11
Figure 2 – Principales industries clientes en 2010	13
Figure 3 – Concept d'entreprise durable	19
Figure 4 – Processus de conception et fabrication des moules	24
Figure 5 – Paramètres de coupe de l'usinage conventionnel, de haute vitesse et de haut rendement	26
Figure 6 – Effets de l'incrément de la vitesse de coupe sur l'outil	27
Figure 7 – Pièce utilisée par Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997) pour les simulations contenant les déviations provoquées par l'outil après l'expérience	29
Figure 8 – Emission de dioxyde de carbone (CO ₂) de l'industrie manufacturière	31
Figure 9 – Consommation d'énergie finale par secteur d'activité	32
Figure 10 – Modèle de recherche	33
Figure 11 – Identification de la zone moulante (1) e de la zone de jointe (2) d'un moule	42
Figure 12 – Fenêtre de compilation du programme <i>WorkNc</i>	53

Liste de Tableaux

Tableau 1 – Position e quote-part du Portugal dans les exportations mondiales du secteur	10
Tableau 2 – Principales destinations des moules portugais en 2010	12
Tableau 3 – Différences entre l’usinage de haute vitesse et l’usinage de haut rendement	26
Tableau 4 – Mesure des temps d’usinage – étude de <i>Tekniker</i> (2008)	28
Tableau 5 – Classes de dimensions des moules VS désignation du type de moule	37
Tableau 6 – Distribution du n. ° d’éléments à analyser dans chaque strate	37
Tableau 7 – Classes de dimensions des moules (unité tonne) avec échantillons par strate	39
Tableau 8 – Synthèse des paramètres de coupe	48
Tableau 9 – Synthèse des temps des simulations effectués	58
Tableau 10 – Exemple de différences entre zones non projetées intrastrates et interstrates	60
Tableau 11 – Synthèse de l’économie en ressources humaines due à la simulation durable	63
Tableau 12 – Consommation moyenne des CNC (kW)	63
Tableau 13 – Synthèse de l’économie énergétique faisant appel à la simulation durable	65
Tableau 14 – Synthèse de la quantité de dioxyde de carbone (CO ₂) non émis pour l’atmosphère en faisant appel à la simulation durable	66
Tableau 15 – Synthèse des résultats de la recherche	68

Liste d'Equations

Equation 1 – Proportion à utiliser dans chaque strate (sh)	38
Equation 2 – Taille de l'échantillon pour chaque strate i (nh_i)	38
Equation 3 – Taille de l'échantillon probabiliste stratifié (n)	38
Equation 4 – Précision de l'estimation des différences des temps de simulation	40
Equation 5 – Economie en homme/machine résultante de la différence de simulation	62
Equation 6 – Consommation énergétique moyenne de la simulation (kWh)	64
Equation 7 – Economie énergétique (€) provenant de la différence de temps de simulation	64

Liste d’Abréviations

ae	–	incrément radiale (latéral)
AICEP	–	Agence pour l’Investissement et Commerce Externe du Portugal
ap	–	incrément axiale (en niveau Z)
CAO	–	Conception Assistée par Ordinateur
CEFAMOL	–	Association Nationale de l’Industrie des Moules Portuguesa
CNC	–	Computer Numeric Control (Contrôle Numérique par Ordinateur)
CO ₂	–	Dioxyde de Carbone
EDP	–	Energies de Portugal
EUA	–	Etats Unis d’Amérique
FAO	–	Fabrication Assistée par Ordinateur
FEIS	–	Fábrica Escola Irmãos Stephens
fz	–	avance par dent
IAO	–	Ingénierie Assistée par Ordinateur
IPM	–	Industrie Portugaise des Moules
ktep	–	kilo tonne équivalent de pétrole
mm	–	millimètre
mm/min	–	unité de l’avance de l’outil (millimètres par minute)
NC	–	Numeric Control (Contrôle Numérique)
ONU	–	Organisation des Nations Unis
PME	–	Petite et Moyenne Entreprise
SI	–	Système International
Ton	–	tonnes
TÜV	–	Technischer Überwachungs-Verein
VC	–	Variable de Contrôle
VD	–	Variable Dépendante
VE	–	Variable Externe
VI	–	Variable Indépendante
VM	–	Variable Médiatrice
WBCSD	–	World Business Council for Sustainable Development

Table des matières

ABSTRACT	i
RESUMÉ	iii
Liste de Figures	v
Liste de Tableaux	vi
Liste d'Equations	vii
Liste d'Abréviations	viii
Table des matières	ix
PARTIE I	1
1 Introduction	1
2 Arguments qui soutiennent la pertinence du thème	3
3 Problème de recherche.	4
3.1 Objectifs de l'étude.	4
3.2 Questions de recherche.	5
4 L'Industrie Portugaise des Moules (IPM)	5
4.1 Qu'est qu'un moule?	5
4.2 Evolution Historique de l'Industrie Portugaise des Moules	6
4.3 Croissance et Caractérisation de l'Industrie Portugaise des Moules	8
5 REVUE DE LA LITTÉRATURE	15
5.1 Développement durable	15
5.1.1 La durabilité de l'entreprise	16
5.2 L'entreprise durable	18
5.3 Le concept d'optimisation	21
5.4 Le processus productif de l'Industrie Portugaise des Moules	22
5.5 L'optimisation du processus productif dans l'Industrie Portugaise des Moules	28
6 Hypothèses	32
7 Modèle de recherche	33
PARTIE II	34

8	MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	34
8.1	Collecte d'information : données primaires et secondaires	34
8.2	Type de Recherche	35
8.3	Population	35
8.4	Échantillon	36
8.5	Caractérisation de l'entreprise où s'est réalisé l'étude	41
8.6	Procédures pour la simulation	41
8.7	Variables	44
8.8	Groupe de contrôle et groupe expérimental	46
8.9	Collecte et définition des paramètres de coupe	47
8.10	Modèle de Simulation par Ordinateur	48
8.11	Logiciel utilisé	50
8.11.1	Méthodologie de développement du modèle de simulation	50
8.12	Validité interne et validité externe	53
	PARTIE III	56
9	ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	56
9.1	Fraisage	56
9.2	Economie dans l'utilisation des ressources	62
9.2.1	Ressources humaines : coût de l'heure homme-machine	62
9.2.2	Ressources énergétiques	63
9.2.3	Ressources environnementales : émissions de dioxyde de carbone (CO ₂)	65
10	CONCLUSIONS	69
10.1	Implications pour le savoir académique	72
10.2	Implications pour la gestion	72
10.3	Limitations de l'étude	74
10.4	Suggestions pour des futures études.	74
11	Références Bibliographiques	75
12	Webographie	79
	ANNEXES	80

PARTIE I

La première partie est constituée par l'introduction, la justification de la pertinence du thème, la présentation du problème de recherche, caractérisation de l'IPM et revue de la littérature. Ainsi, l'optimisation du processus productif dans l'IPM est mis en contexte dans une perspective durable qui contribue, d'un côté, pour que l'entreprise devienne plus compétitive (réduction des consommations de main d'œuvre et énergie) et, d'autre part, contribue pour la préservation de l'environnement pour les nouvelles générations (avec la diminution de la consommation énergétique et conséquente réduction dans les émissions de dioxyde de carbone pour l'atmosphère). Enfin, les hypothèses à tester ont été définis et le modèle de recherche dessiné.

1 Introduction

Cette dissertation a pour objectif contribuer pour l'optimisation du processus productif dans l'Industrie Portugaise des Moules (IPM) pour injection de plastique à travers la réduction des temps de fraisage lors de l'usinage des zones de jointe des matrices et noyaux. Il est important souligner que le fraisage est fondamental pour le processus de fabrication du moule, car cette méthode est celle qui est plus économique pour l'enlèvement de matière dans la définition de la géométrie de la pièce prétendu. Ainsi, la plupart des pièces passe par cette section, étant ainsi considéré comme le « cœur » du processus productif de l'industrie des moules.

Dans ce contexte, il sera présenté un processus de fraisage innovateur/durable¹ quand comparé à celui vulgairement utilisé/conventionnel² et seront analysées les résultats obtenus à travers la simulation.

Dans le secteur des moules, l'optimisation du processus productif est un thème particulièrement important, une fois que repenser les processus productifs non seulement augmente la compétitivité des entreprises à travers l'efficacité des processus, comme contribue pour la protection de l'environnement, dans une perspective durable. La préoccupation avec l'impact environnemental de l'activité contribue pour la

¹ Il est considéré comme **fraisage durable** l'alternative proposée par cette étude et qui implique la différenciation de finition entre la zone moulante et la zone d'ajustement. Avec ce type de fraisage ira augmenter l'incrément axial et/ou radial selon l'opération de finition.

² Il est considéré comme **fraisage conventionnel** celui qui s'effectue actuellement et qui se caractérise par le même type d'usinage des zones moulantes et d'ajustement.

durabilité de l'entreprise, une fois qu'elle permet la diminution des coûts et améliore sa relation avec le marché.

Cette investigation se centre sur l'analyse de différentes stratégies d'usinage (la conventionnelle et la durable) et sur la mesure de ses temps à travers la simulation. Nous prétendons enquêter si les paramètres de coupe influent les temps de production des moules avec des différents tonnages et vérifier si la stratégie d'usinage proposée, désignée par durable diminue les coûts de l'entreprise et son impact environnemental. Nous prétendons, à travers un processus de simulation en logiciel (utilisé quotidiennement dans l'entreprise pour la création de programmes), mesurer les effets directs des stratégies d'usinage simulées sur les temps productifs, et les indirects sur les heures homme-machine, sur la consommation d'énergie et sur l'environnement.

Cette étude est divisée en 3 parties. La première est constituée par l'introduction, la justification de la pertinence du thème, la présentation du problème de la recherche, la caractérisation de l'IPM et la revue de la littérature. Ainsi, il est mis en contexte l'optimisation du processus productif dans l'IPM selon une perspective durable qui contribue, d'un côté, pour que l'entreprise soit plus compétitive et, d'un autre, pour la préservation de l'environnement pour les nouvelles générations (avec la diminution de la consommation énergétique et la conséquente réduction dans les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère). Finalement, les hypothèses à tester ont été défini et le modèle de recherche dessiné.

Dans la deuxième partie il est expliqué le processus de construction de la recherche dans tous ses moments: collecte d'informations, le modèle de recherche choisi, population à qui est destiné, construction de l'échantillon, caractérisation de l'entreprise où s'est réalisé l'étude, les variables et les groupes de contrôle et expérimental, recueille et définition des paramètres de coupe, le modèle de simulation par ordinateur, le logiciel utilisé et, finalement, la validité interne et externe de l'étude.

Dans la troisième partie, les résultats concernant les différences de temps entre les simulations conventionnelles et durables (simulation proposée pour cette dissertation) seront analysés et discutés relativement au processus de fraisage et aux ressources (humaines, énergétiques et environnementales) et les implications pour le savoir académique et pour la gestion seront présentés. Les limitations de l'étude et quelques suggestions pour des futures études seront énoncées.

2 Arguments qui soutiennent la pertinence du thème

Traditionnellement, le développement économique et la protection de l'environnement apparaissent comme des éléments inconciliables. Pourtant, il est impossible de ne pas comprendre que, d'un côté, la planète a une capacité limitée en tant que fournisseur de ressources et, d'un autre, la croissance de la population et la modification des habitudes de consommation, ont menés à une nécessité d'augmentation de la production (Ferreira, 2010). Selon Savitz (2007) et le *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2010)³, en 2050, avec la population mondiale qui s'approche des 9 milliards, il sera nécessaire les ressources de cinq planètes comme la Terre pour que les peuples de la Chine, Inde et Afrique consomment des ressources avec la même intensité que les américains d'aujourd'hui.

L'ONU (2011a) a alerté pour l'importance de l'insuffisance de ressources, considérant que cela sera le grand défi du secteur industriel, une fois que l'insuffisance de ressources se reflète sur les coûts de la matière première et de l'énergie utilisée pendant le processus productif. Ce que nous proposons dans cette dissertation c'est l'optimisation du processus productif dans le secteur de fraisage de l'Industrie Portugaise des Moules (IPM), car les entreprises qui rentabiliseront mieux ses ressources, en améliorant ses processus productifs, seront plus efficaces et compétitives et, naturellement plus durables. Avec cette dissertation, nous prétendons montrer que la modification de certaines procédures adoptées pourra mettre le secteur des moules portugais en avantage, augmentant sa compétitivité nationale et internationale. Selon Young (2007) et El-Haggar (2007), les entreprises ont des profits avec la durabilité, c'est à dire que l'efficacité des processus origine une entreprise plus durable et, d'un autre côté, améliore sa relation avec le marché. Dans ce contexte, les matériaux choisis pour la production d'un bien doivent être soigneusement sélectionnés car ainsi nous minimisons d'une part le gaspillage de la matière première et, de l'autre, l'impact environnemental en évitant les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), par exemple.

Cette dissertation se centre sur le processus productif, c'est à dire, au moment où se produit la transformation de la matière première (l'acier) dans l'outil (le moule) à travers le processus d'usinage/fraisage. De cette façon, il est proposé repenser l'opérationnalisation du processus productif, ainsi comme suggère El-Haggar (2007),

³ in ONU, 2011a

pendant la construction du programme de CNC (la simulation du parcours de l'outil⁴), réduisant les temps de l'usinage et, ainsi la consommation des ressources humaines, énergie, consommables, entre autres, pendant que sont minimisées les impacts environnementaux. Avec cette étude, nous prétendons que l'IPM contribue pour un développement durable et pour l'optimisation du processus productif à travers l'adoption du fraisage durable, favorisant ainsi la diminution des coûts de production et de l'impact environnemental de l'entreprise, ainsi comme pour l'amélioration de son image et celle de ses produits (Young, 2007).

3 Problème de recherche.

3.1 Objectifs de l'étude.

Les objectifs définis pour cette étude sont:

- réduire les temps d'usinage des zones moulantes (matrice et noyau) dans la phase de finition du fraisage du processus productif du moule;
- analyser la relation entre les types de fraisage et temps respectifs dans la phase de finition du processus productif du moule ;
- développer et mettre en œuvre le processus de fraisage durable pour économiser des ressources humaines, diminuer la consommation énergétique et l'émission du dioxyde de carbone;
- vérifier si le processus de fraisage durable diminue l'impact environnemental ;
- appliquer cette étude à des moules avec des dimensions différentes (tonnage).

Selon Malakooti et Deviprasad (1989) et Hatna, Grieve et Broomhead (1998), l'optimisation des conditions de coupe (de fraisage) doit impliquer la maximisation de l'enlèvement du matériel dans la phase de d'ébauche, garantir la qualité désirée et la tolérance pré définie de la surface usiné lors de la phase de finition, car ainsi il sera possible améliorer la productivité, réduire les temps d'usinage et augmenter la vie utile des outils. Dans ce contexte s'encadrent les objectifs définis pour cette étude une fois

⁴Le parcours de l'outil est constitué par plusieurs incréments radiaux et axiaux qui, dans l'ensemble, sont désignés par programme CNC.

qu'il se prétend réduire les temps de fraisage de façon à améliorer la compétitivité économique et l'impact environnemental de l'entreprise.

3.2 Questions de recherche.

Pour accomplir les objectifs de la recherche des questions de départ ont été posées:

- l'augmentation de l'incrément radiale et axiale dans le programme d'usinage contribue pour l'optimisation du processus de fraisage?
- augmentant l'incrément radiale et axiale dans le programme d'usinage, arriverons-nous à des meilleurs temps de fraisage dans la phase de finition?
- ces changements de programmation peuvent être utilisés pour des moules de différentes dimensions (tonnages)?
- en faisant appel au fraisage durable, arriverons-nous à réduire les coûts du processus productif des entreprises de l'IPM?
- l'utilisation du fraisage durable permet-elle de réduire l'impact environnemental des entreprises de l'IPM?

4 L'Industrie Portugaise des Moules (IPM)

4.1 Qu'est qu'un moule?

Un moule est un récipient prototype qui a pour finalité produire un objet avec une forme spécifique. Dans le secteur des moules, il existe plusieurs classements en fonction de la technologie utilisée ou de la matière première à mouler. Quant au premier, ils peuvent être classés en technologie d'injection, compression, transfert, soufflage, thermoformage et rotative. Quant au deuxième, ils peuvent être classés en thermoplastiques, thermodurcissables, caoutchouc, alliages légers et glace (Ferreira, 2001).

Un moule simple en acier (pour l'injection de thermoplastique/plastiques) est constitué par deux parties: une féminine (matrice) et une autre masculine (noyau ou mâle) qui

s'emboîtent l'une dans l'autre. Après emboîtées, il existe un espace avec une épaisseur déterminée et rigoureuse dans lequel le fluide (matière première) se loge pour être moulé.

Les moules sont fabriqués pour une grande variété d'industries avec des différents niveaux de complexité (pouvant aller de l'industrie automobile jusqu'à l'agriculture). Néanmoins, un moule individuel n'est pas plus qu'un outil hautement personnalisé, servant exclusivement pour produire des pièces (en petite ou grande série) pour lesquelles il a été conçu (Rodrigues, 2002).

Suivant la complexité, numéro des pièces à injecter, type d'industrie à qui il se destine, entre autres facteurs, chaque moule a différentes conditions qui influencent directement la méthode de construction, le temps de livraison et son coût. Néanmoins, ils exigent un ensemble de conditions dimensionnelles et géométriques, qui requièrent des personnes qualifiés et des équipements précis (Ferreira, 2001).

4.2 Evolution Historique de l'Industrie Portugaise des Moules

À l'origine de l'Industrie Portugaise des Moules pour injection de matériaux plastiques nous trouvons la création de la première usine de verre du Portugal (en 1719), dont la construction fut ordonnée par D. João V, à *Coima*, dans la commune de *Barreiro*, Lisbonne, Portugal. Néanmoins, c'est seulement le 16 octobre de 1769 que la « *Real Fábrica do Vidro* », aujourd'hui connu par « *Fábrica Escola Irmãos Stephens* » (FEIS) (Ferreira, 2001; Rodrigues, 2002), commence son activité à *Marinha Grande* (Portugal), devenant fondamentale pour le développement des compétences des travailleurs qui seront, plus tard, employés dans l'Industrie des Moules (Rodrigues, 2002). Effectivement, l'histoire de l'IPM est intimement liée à l'industrie portugaise du verre (Rodrigues, 2002), non seulement parce que la deuxième fut le précurseur de la première, mais aussi parce que les premiers moules produits étaient destinés à l'industrie du verre ce qui a permis “*the development of a skilled workforce, as well as competences and technical capabilities that were essential for the production of moulds for plastic*” (Rodrigues, 2002:93).

L'apparition de la première usine de plastiques au Portugal (1935) apporte une nouvelle opportunité de développement pour le secteur qui, au-delà de servir l'industrie du verre,

commence à produire des moules pour bakélite (une des premières matières premières plastiques utilisé dans la production de couvercles et d'autres pièces simples de plastiques (Ferreira, 2001). Aníbal H. Abrantes et son frère ont commencé ainsi la production de moules pour l'industrie de plastique pressé, avec sa première unité (moule) en 1937 (Rodrigues, 2002).

Malgré la II Guerre Mondiale (1930-1945) avoir affecté la production des moules dans les deux pôles industriels existants au Portugal (*Marinha Grande* et *Oliveira de Azeméis*) (Beira, 2007), c'est en 1944 que Aníbal H. Abrantes a créé une entreprise dédiée exclusivement à la production des moules pour l'industrie de plastique, dans un pas précurseur de ce qui serait l'IPM pour plastiques (Rodrigues, 2002).

En 1946 apparaît un nouveau type de matière plastique, le thermoplastique, « *qui présente comme caractéristique fondamentale la modification de propriétés physiques et mécaniques tel comme la température* » (Ferreira, 2001). Dans cette même année, l'entreprise Santos & Abrantes, à *Oliveira de Azeméis* produit son premier moule pour injection de thermoplastique (Cefamol, 1996). Cette nouvelle technique pour produire des pièces en plastique a révolutionné, à tous les niveaux, le marché de la production et commercialisation de pièces plastiques (Ferreira, 2001). La spécificité du secteur permet une formation spécialisée et la qualification de beaucoup de collaborateurs qui sont devenus entrepreneurs et ont créés leur propre entreprise, contribuant ainsi pour la croissance et le développement de l'IPM (Rodrigues, 2002). Actuellement il subsiste encore certaines de ces entreprises dont la réputation national et international est incontestable (Rodrigues, 2002), gérées par des personnes qui ont appris l'art de « travailler l'acier ». Voici la raison pour laquelle l'entreprise d'Aníbal H. Abrantes a été considérée « l'université » de l'IPM dans le secteur des moules pour injection de plastique (Rodrigues, 2002).

En 1954 le secteur souffre une autre transformation provoquée par l'internationalisation des ventes. Les premiers pays furent le Royaume Unis et les États-Unis d'Amérique, suivi par le monde entier (Rodrigues, 2002). À cette époque, toute la production était exportée et cela a attiré de nouveaux clients étrangers, permettant encore une fois la croissance du secteur avec l'apparition de nouveaux intermédiaires, entreprises, fournisseurs et autres agents. La consommation élevée que l'on pouvait vérifier dans les années 50 a permis la croissance du secteur en se maintenant comme points forts les

villes de *Marinha Grande* (commune d'Aveiro) et *Oliveira de Azeméis* (commune d'Aveiro) qui servaient les industries de l'automobile, l'aéronautique, l'électronique, les électroménagers et les jouets (Rodrigues, 2002).

En 1980, le pays exportait pour plus de 50 pays, existant, seulement dans la *Marinha Grande*, 64 entreprises qui employaient un total de 2000 personnes (Cefamol, 1996). En 1983, l'entreprise innovatrice et visionnaire Aníbal H. Abrantes « *a été la première société européenne dans ce secteur à installer la technologie CAO⁵/FAO⁶, systèmes informatisés utilisés dans le projet de conception et de production* » (Ferreira, 2001:20). Effectivement, les entreprises portugaises sont parmi les premières utilisatrices de la technologie de soutien au projet et fabrication des moules métalliques pour injection de plastique, (CAO/IAO⁷/FAO), ce qui, selon Rodrigues (2002), permet d'augmenter la compétitivité des entreprises à travers la diminution des délais de livraison et la réduction des coûts, mais sans mettre en cause la qualité du produit.

Depuis lors, toute l'IPM a investi beaucoup dans sa modernisation de façon à être actualisée tant au niveau technologique, comme au niveau de l'investigation et du développement, comme l'affirme Rui Tocha, directeur général de *Centimfe* (Tocha in *Jornal Região de Leiria*, 2012) « *L'industrie est en train de faire deux choses : investir dans le renforcement de la capacité existante actuelle et se positionner pour entrer dans des nouvelles chaînes de production, pour entrer dans des nouvelles niches technologiques* »

4.3 Croissance et Caractérisation de l'Industrie Portugaise des Moules

Les données mis à disposition par Cefamol (2011) indiquent que, en 2010, le secteur des moules portugais était constitué par « *532 entreprises, avec une dimension de PME, dédiées à la conception, développement et fabrication des moules et outils spéciaux, avec une distribution géographique bipolaire entre la Marinha Grande et Oliveira de Azeméis* » (Cefamol, 2011:2), employant 8250 collaborateurs jusqu'au moment. Néanmoins, la subsistance du secteur n'a pas été linéaire et son processus de croissance reflète ce parcours.

⁵CAO – Conception Assistée par Ordinateur

⁶FAO – Fabrication Assistée par Ordinateur

⁷IAO – Ingénierie Assistée par Ordinateur

Après une croissance continue pendant les années 40 à 70 (Rodrigues, 2002), l'industrie atteint son sommet dans les années 80, considérées les meilleurs depuis toujours de l'IPM (fait auquel n'est pas étrange l'entrée du Portugal dans l'Union Européenne), une fois qu'il s'est vérifié une augmentation exponentielle dans la fabrication des moules, aidée par la rapide croissance du « marché des plastiques » international, faisant ainsi que ce soit difficile pour l'IPM répondre à toutes les demandes une fois que l'offre n'arrivait pas à satisfaire la demande (Rodrigues, 2002).

Dans les années 90 commence le ralentissement de l'industrie, résultat de la concurrence croissante, de la crise économique du début de la décennie et des taux d'intérêt élevés (*O Molde* n°20 e n°21, 1993). Dans les années 2000, cette tendance s'est accentuée, menant ainsi à une stagnation sans précédents dans le secteur (Rodrigues, 2002). Ce n'est pas avec surprise qu'il s'est enregistré, jusqu'à 2010, une légère diminution dans la création d'entreprises et dans l'employabilité du secteur qui, jusqu'au moment, était vu comme un exemple de l'industrie national (*O Molde* n° 89, 2011; *Cefamol*, 2011).

La façon comme l'IPM est attentive aux exigences de ses clients peut justifier pourquoi environ 90% de la production est destinée à l'exportation (voir Figure 1), une fois que ce secteur a des collaborateurs avec le *savoir-faire* et la technologie adéquate pour satisfaire les nécessités de ceux qui recherchent l'industrie portugaise, ce qui lui a permis de survivre malgré les difficultés. Selon Vieira (2007:55)

« le succès de l'industrie national des moules se doit, fondamentalement, aux aspects suivants :

- très bonne image internationale ;*
- capacité élevée pour s'adapter aux évolutions technologiques et de marché ;*
- sensibilité à l'innovation et à la modernisation ;*
- capacité productive installée élevée, avec utilisation de nouvelles technologies ;*

–ressources humaines avec forte expérience empirique.”

Vieira (2007) ajoute encore que pour maintenir les niveaux d'exportation, le secteur devra primer par la technologie et par la modernisation du parc des machines existant,

“seulement ainsi le secteur sera capable de répondre :

- aux nécessités des industries clientes (de plus en plus exigeantes) ;*

- à la correcte gestion et planification de la production (pour pouvoir répondre aux délais de livraison en temps réduit et offrir des prix compétitifs) ;
- au contrôle et amélioration de la qualité de ses produits et services (par l'investissement en formation professionnelle, ce qui est fondamental pour la création de ces éléments de compétitivité, essentiels dans les marchés internationaux) » (Vieira, 2007:55-56).

Le rapport de l'AICEP (Agence pour l'Investissement et le Commerce Externe de Portugal), publié en 2012 (voir Tableau 1), montre que dans la période 2005-2009 Portugal se maintient, en moyenne, dans la 11^{ème} place au niveau mondial, avec une quote-part moyenne d'exportations de 3%, ce qui, au niveau mondial n'est pas significatif, une fois que, en 2009, la Chine et le Japon ont présentés des résultats concernant les exportations de 13,99% et 11,47%, respectivement.

Tableau 1 – Position e quote-part du Portugal dans les exportations mondiales du secteur

Posição e Quota de Portugal nas Exportações Mundiais do Sector						Em 2009, China e Japão foram os principais exportadores mundiais de moldes, com quotas de 13,99% e 11,47%.
	2005	2006	2007	2008	2009	
Posição	12	11	12	10	8	
Quota (%)	2,94	3,13	2,88	3,29	3,56	

Source: AICEP (2012)

Malgré le Portugal ne pas avoir, au niveau international, une position manifestement significative, l'IPM c'est importante pour l'économie national car les données de 2011 fournies par la Banque du Portugal (2012) montrent que d'un point de vue général, Portugal a eu une diminution de ses exportations de 0,9 points de pourcentage de 2010 (16%) pour 2011 (15,1%). Pourtant, dans le secteur des moules il s'est vérifié une augmentation des exportations dans l'ordre des 15 % en 2011 pour différents pays : Brésil (80%), Pologne (50%), France (50%) e Espagne (17%) (Journal *Região de Leiria*, édition online du 30 de avril de 2012), ce qui, selon João Faustino, président de Cefamol, dans des déclarations au Journal *Região de Leiria* (édition online de 30 de avril de 2012), se doit à “un retour graduel des clients qui s'étaient tournés vers l'Asie » et qui « reviennent effrayés par des problèmes au niveau de la qualité, des coûts de manutention pendant le processus productif et des questions liées à la confidentialité des contrats ».

Il est important mettre en évidence que le secteur des moules se divise en deux zones géographiques (*Marinha Grande et Oliveira de Azeméis*) jouant un rôle important pour l'économie local et pour les niveaux de employabilité des régions mentionnés, comme il a été dit auparavant, malgré la diminution de ceux-ci en 2010 (*O Molde* n.º 89, 2011; *Cefamol*, 2011).

Pendant la première décennie du XXI siècle, une diminution de la création d'entreprises s'est vérifiée, mais, comme il a été dit auparavant, le secteur des moules a résisté à plusieurs adversités des marchés, en maintenant un taux moyen d'exportation proche des 90% pendant la décennie 2000-2010 et, selon *Cefamol* (2011), la balance commerciale du secteur des moules, de la dernière décennie au Portugal, a été hautement exportatrice, passant de 234,23 millions d'euros (année 2000) à 259,2 millions d'euros (année 2009).

Le rapport de l'AICEP (2012) présente les valeurs d'exportation du secteur de l'IPM dans la période de 2006-2010 (voir Figure 1). Il est observé que les valeurs d'exportation sont toujours supérieures aux valeurs de l'importation, malgré l'augmentation de celle-ci. Ces données corroborent celles présentées par *Cefamol* (2011) pour l'année de 2010, pendant laquelle l'IPM aurait un volume de production de 350 millions d'euros, desquels 90% résulteraient des exportations, ce qui équivaut à 318 millions d'euros.

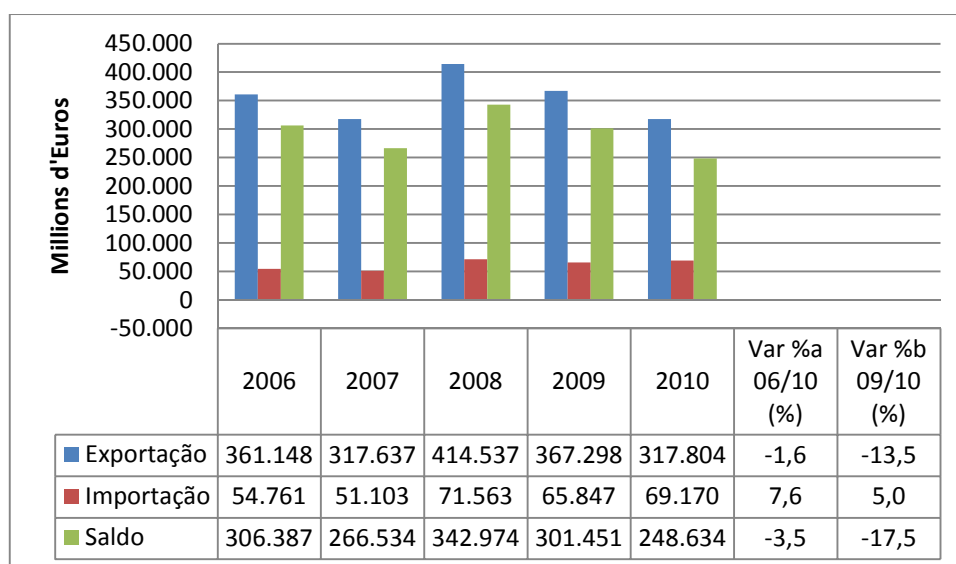


Figure 1 – Balance commerciale du secteur entre 2006-2010

(unité - millions d'euros)

Source: AICEP (2012)

La prédominance de l'exportation (approximativement 90% de la production national) (voir Tableau 2) protège le secteur de la situation économique portugaise, mais le rend hautement vulnérable à la situation économique des pays clients. Néanmoins, sa diversité commerciale (les entreprises clientes sont de différents secteurs) et la diversité des pays (80 pays) aident à baisser le risque auquel le secteur est exposé.

Avec la spécialisation élevée du secteur, de nombreux pays font appel aux services de l'IPM pour obtenir des produits de haute qualité. Le Tableau 2 montre que du total des exportations, 80% se destinent à la zone économique européenne, de laquelle sont mis en évidence les pays suivants : Allemagne (27,97% qui correspond à 88,893 millions d'euros), Espagne (16,94% qui correspond à 53,836 millions d'euros), France (13,53% qui correspond à 42,985 millions d'euros) et République Tchèque (3,99% qui correspond à 12,667 millions d'euros).

Tableau 2 – Principales destinations des moules portugais en 2010
(unité en millions d'euros et pourcentage)

Principaux Clients du Secteur	2010	
	Millions Euros	%
Allemagne	88.893	27,97
Espagne	53.836	16,94
France	42.985	13,53
République Tchèque	12.667	3,99
Mexique	11.710	3,68
Etats Unis d'Amérique	11.669	3,67
Royaume Unis	10.964	3,45
Argentine	9.681	3,05
Pologne	8.741	2,75
Brésil	8.030	2,53
Suisse	8.003	2,52
Belgique	5.673	1,79
Pays-Bas	5.381	1,69
Russie	5.380	1,69
Slovaquie	4.004	1,26
Autres	30.188	9,50

Source: AICEP (2012)

Malgré la diversité des industries clientes, sur la Figure 2 il est évident l'importance de l'industrie automobile pour l'IPM, représentant 72% de sa production total (face aux

14% de 1991 (*Cefamol*, 1996)), clairement éloignée des industries des électroménagers (6%) et des emballages (5%), entre autres, ce qui montre une certaine vulnérabilité pour la production portugaise des moules (72% de l'exportation de l'année de 2010 s'est destiné à l'industrie automobile) (*Cefamol*, 1996).

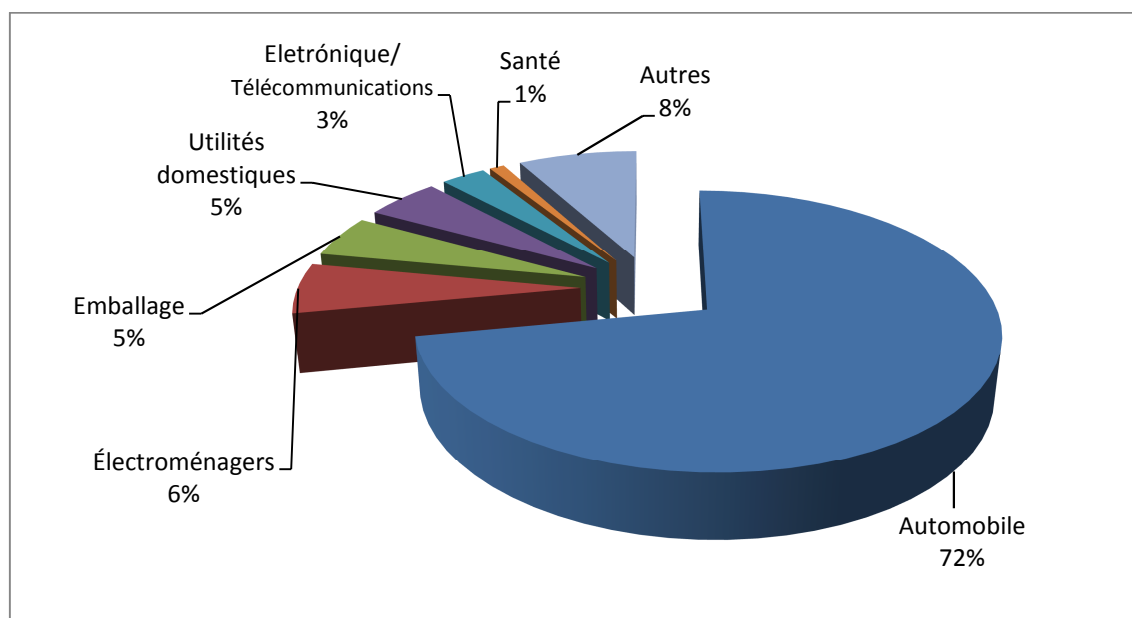


Figure 2 – Principales industries clientes en 2010

Source: *Cefamol* (2011)

Joaquim Menezes (président du groupe *Iberomoldes*) a déclaré, dans une entrevue à la Magazine Invest (2011), qu'à partir des mois avril/mai de 2011 (en s'intensifiant pendant les mois d'été), les entreprises portugaises de moules pour injection de plastique ont vérifié une augmentation des commandes de la part des clientes européens, notamment de l'industrie automobile, malgré que ce soit un « *secteur où s'est vérifiée une rétraction dans ces trois dernières années* » (Invest, 2011:10), fait corroboré par l'entrepreneur Leonel Costa dans la revue mentionnée. La conquête de nouveaux clients et le retour d'autres ont mené l'entrepreneur Joaquim Menezes (Invest, 2011:10) à affirmer que « *la capacité installée pour le respect des délais* » est compliquée, car l'industrie montre quelques difficultés pour satisfaire la demande. Au-delà du secteur automobile, l'industrie électronique, électrique, médicale et pharmaceutique sont aussi en train de commander des moules pour des nouveaux produits (Joaquim Menezes, 2011; Leonel Costa, 2011 in Invest, 2011:10).

D'un autre côté, en même temps que les changements et transformations des marchés se succèdent, les entreprises passent maintenant par une phase de transition (le passage de la gestion pour la génération familiale suivante, sauf rares exceptions) (*Cefamol*, 2011), ce qui permet au secteur de pouvoir compter avec une nouvelle génération de gestionnaires plus préparée, avec plus et de meilleures connaissances, fondamentales pour une compétitivité féroce des marchés actuels, comme nous pouvons constater avec les résultats concernant les exportations présentés par la Chine et par le Japon en 2009 (voir Tableau 1): 13,99% et 11,47%, respectivement (AICEP, 2012).

5 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette section de la dissertation sera centrée sur le processus de fraisage de l'IPM et son optimisation selon une perspective durable, ce qui implique la clarification des concepts d'optimisation, de développement durable et d'entreprise durable.

5.1 Développement durable

La notion de développement durable apparait, pour la première fois, dans le rapport Brundtland de l'ONU, en 1987 (ONU, 1991):

« Le développement suppose une transformation progressive de l'économie et de la société » c'est pourquoi « Le développement durable est celui qui tient compte des nécessités du présent, sans compromettre la possibilité des futurs générations tenir compte de leurs propres nécessités (Rapport Brundtland, 1991:46).

Néanmoins, qu'est-ce le développement durable, c'est-à-dire, en quoi il peut contribuer activement pour une transformation sociale qui ne compromette pas les futures générations et satisfasse les nécessités de l'actuelle, cette question est vu de différentes formes par différents auteurs, même si tous considèrent les axes économique, environnemental et social. Ainsi, Hoffman et Bazerman (2008) se sont focalisés sur l'éco-efficacité, la responsabilité sociale corporative et sur la transparence et inclusion. Pereira (2009) défend que le développement durable dépende de l'équilibre dynamique entre trois piliers : création de richesse, protection de l'environnement et inclusion sociale. Loures (2009)⁸ renforce l'idée précédente en affirmant que la défense du développement durable est la défense des sociétés humaines et, en particulier, des organisations, qui dépendent de la transformation, de la façon comme, par exemple, s'organisent les processus productifs.

Ferreira (2010) a utilisé une enquête basée sur une autre déjà existante, construite par le “*Boston Consulting Group*” et le “*MIT Sloan*” avec l'intention de mieux comprendre la liaison entre le développement durable et la définition de stratégies de gestion. Cette enquête a été faite à 350 personnes qui travaillent dans des secteurs aussi différents tels comme l'enseignement, l'industrie, les services, entre autres. Pour cela, Ferreira (2010)

⁸ in Vasconcelos et Filho (2009)

a considéré important savoir ce que les personnes liées à une certaine branche professionnel comprennent par développement durable. Son étude lui a permis de conclure que le développement durable est un concept qui produit quelques désaccords concernant sa définition conceptuelle, car le concept le plus choisi par les enquêtés (48%) fut celui présenté par le Rapport Brundtland (1991:46), probablement pour être une perspective plus global et plus populaire. Les autres réponses ont associé le concept seulement à son volet environnemental, d'autres à la manutention et viabilité financière des affaires, en excluant le volet environnemental et sociale, ce qui montre une vision partiel du concept.

Ferreira (2010) défend que le développement durable implique la création de nouvelles solutions pour les problèmes et que les conséquences de cette forme de développement (perspective à long terme, économie, optimisation et efficacité, interdépendance et coopération) sont transversales à tout secteur. Néanmoins, il avertit que la résistance au changement et la dépendance concernant le *leadership* peuvent rendre difficile la mise en place de mesures durables (réduction de gaspillage, amélioration de l'efficacité énergétique, solutions d'énergie « propre », réduction ou élimination d'émissions de gaz à effet de serre, entre autres).

Dans ce contexte, l'auteur considère comme développement durable les implications dans la réduction des coûts et dans l'impact environnemental des entreprises qui dérivent de nouvelles solutions adoptées dans le processus productif et qui, en dernière analyse, visent ne pas compromettre les générations actuelles et futures en ce qui concerne la disponibilité des ressources naturelles, une fois que l'ONU (2011a) a indiqué comme défi du siècle l'insuffisance de ressources.

5.1.1 La durabilité de l'entreprise

Ferreira (2010) nous montre que l'adoption de solutions qui contribuent pour le développement durable implique une perspective à long terme, optimisation et efficacité, interdépendance et coopération, ce qui permet d'économiser. Dans cette perspective, optimiser le processus productif dans la phase de fraisage implique l'adoption de nouvelles solutions qui contribuent pour l'efficacité des entreprises et l'économie des ressources, transformant le développement durable en allié de la compétitivité.

Effectivement, le développement durable va se révéler fondamental, à moyen et long terme, pour la compétitivité (Young, 2007; Ferreira, 2010) et les entreprises qui arriveront à développer des stratégies pour affronter l'insuffisance de ressources (énergie, ressources humaines, consommables, entre autres) gagneront en compétitivité (Epstein, 2008; ONU, 2011b).

Le développement durable permet améliorer l'image de l'entreprise et une réduction des coûts lui donnant ainsi un avantage concurrentiel car les organisations durables sont celles qui adoptent des stratégies qui les rendent économiquement viables et compétitives en s'inquiétant avec l'environnement et contribuant pour le développement de la région/pays où elles se trouvent (Almeida, 2002; Leal, 2009)⁹. Ainsi, le développement durable est une opportunité commerciale et pas un entrave au développement (Ferreira, 2010), car il contribue activement pour la transformation des entreprises et pour son avantage concurrentiel.

Gomes (2009), avec l'étude de cas réalisé dans *Corticeira Amorim* a interviewé cinq dirigeants de l'organisation¹⁰ et a conclu que dû à la spécificité de l'entreprise, les dirigeants voient le développement durable comme une caractéristique intrinsèque au développement de la propre entreprise. Selon le directeur général de Amorim & Irmãos, le développement durable a apporté à l'entreprise des gains au niveau de sa « *part de marché ; innovation ; différenciation ; efficacité opérationnelle avec des économies d'énergie qui dépassent déjà le demi-million d'Euros* » (Gomes, 2009:71), fait qui, en 2009, a permis à l'entreprise d'être « *distinguée par le Programme Motor Challenge (de la Commission Européenne) pour l'amélioration de l'efficacité énergétique* » (Gomes, 2009:72).

Des interviews faites aux dirigeants rejettent aussi la relation entre développement durable et la globalisation de l'entreprise une fois que ces questions « *étaient déjà importantes dans les marchés comme celui de l'Australie, EUA et autres avant d'être débattus au Portugal* » (Gomes, 2009:70), et avec le marché, ayant des clients qui recherchaient ses produits parce qu'ils étaient durables, ce qu'ils considéraient comme

⁹ in Menezes *et al*, 2010

¹⁰ "Jorge Peixoto, directeur général de Amorim Florestal; Vítor Ribeiro, directeur général de Amorim & Irmãos; Jorge Santos, directeur général de Amorim Revestimentos; Paulo Oliveira, directeur général de Amorim Cork Composites et Paulo Bessa, gestionnaire pour le Développement Durable Corporatif de Corticeira Amorim, S.G.P.S., S.A." Gomes (2009:44).

« un facteur de différenciation de l'entreprise face aux concurrents » (Gomes, 2009:71) qui

“ passe fondamentalement par l'amélioration de l'image au niveau des produits et au niveau de la crédibilité et professionnalisme de l'entreprise, qui 'aident à soutenir les affaires' et à renforcer la 'reconnaissance institutionnel et international' de Corticeira Amorim ” (Gomes, 2009:71).

Dans ce sens, Ferreira (2010) a aussi conclu qu'il y a une nécessité pressante de développer et de mettre en œuvre des pratiques durables dont les bénéfices se reflètent *« essentiellement dans l'amélioration de l'image corporative, mais aussi dans la réduction des coûts, dans l'avantage concurrentiel qui s'obtient ou dans l'innovation du modèle commercial »* (Ferreira, 2010:99).

Dans le cas spécifique de l'IPM, il est important souligner que l'industrie doit se mobiliser avec l'intention d'aider son client, avec *« l'introduction de nouveaux modèles écologiques dans le marché »* (O Molde n.º 89, 2011) et, tel comme El-Haggar (2007) ajoute, ces *« nouveaux modèles économiques »* pourront passer par de nouvelles technologies (équipements), des nouvelles formes d'usinage (comme est le cas du fraisage durable), ou même de nouveaux matériaux d'injection plus amis de l'environnement. Le facto du développement durable contribuer pour l'amélioration de l'image de l'entreprise auprès des clients, ce qui, autre le fait d'être un avantage concurrentiel, peut contribuer pour l'internationalisation des entreprises (Gomes, 2009), est particulièrement important dans un secteur hautement exportateur comme celui des moules.

5.2 L'entreprise durable

Selon ce qui a été dit, le développement de pratiques durables, comme l'optimisation du processus de fraisage, sont fondamentaux pour la compétitivité de l'entreprise. Une entreprise durable (voir Figure 3) est une entreprise éco efficiente, c'est-à-dire elle atteint des niveaux de production plus élevés avec moins de ressources et moins d'impact négatif sur l'environnement (Melo, 2006; Oliveira, 2008).

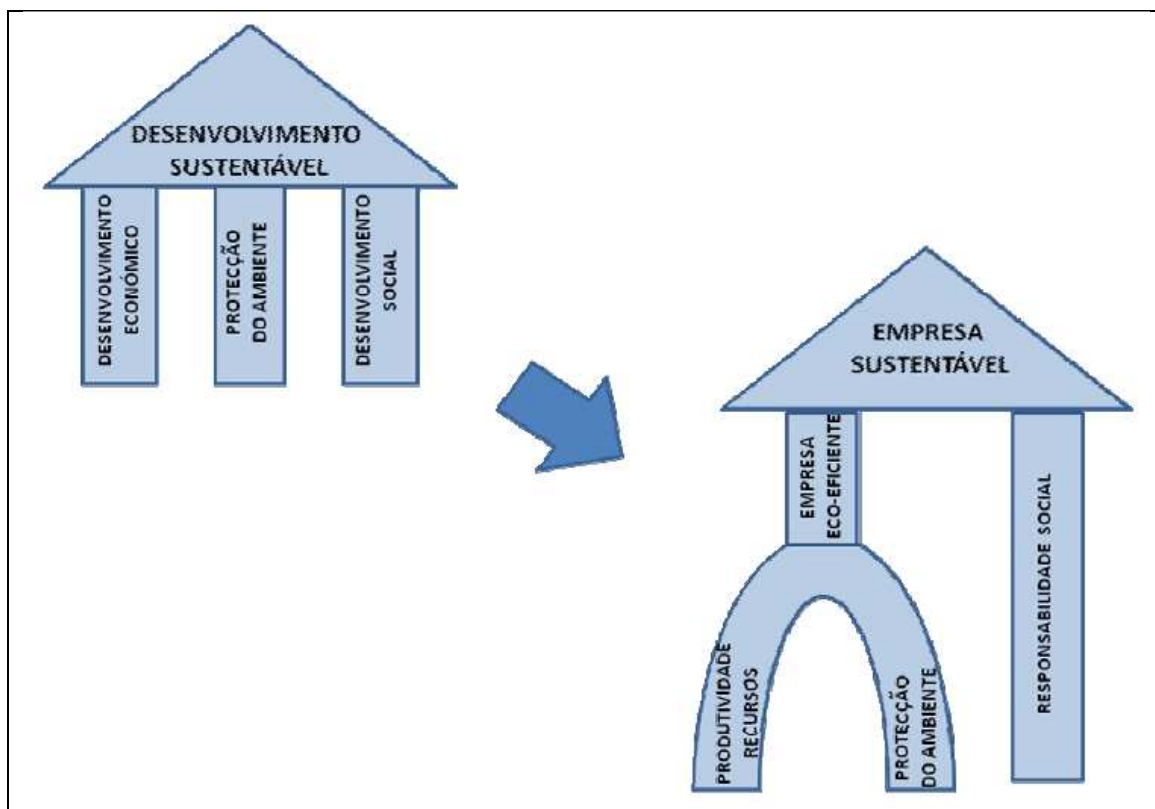


Figure 3 – Concept d'entreprise durable

Source: Oliveira, 2008:18

L'éco-efficacité promeut la production de richesse à travers l'utilisation de moins de ressources, devenant ainsi un outil indispensable pour le développement durable. Le concept apparaît en 1992 par Stephan Schmidheiny, et en termes génériques, défend que la croissance économique et la préservation de l'environnement ne sont pas des objectifs antagonistes et que l'industrie ne doit pas être, obligatoirement, une partie du problème (Oliveira, 2008), car l'éco-efficacité permet de concilier l'efficacité productive, la réduction des coûts et l'utilisation durable des ressources (Lins et Wajnberg, 2007¹¹).

Jorge (2011) a réalisé une étude de cas dans l'entreprise Esporão S.A. sur la consommation d'eau dans le processus de la production de vin, importante pour l'entreprise une fois que l'eau est un *"ressource naturel structural et stratégique, c'est un factor essential pour le développement de l'économie de la compagnie"* (Jorge, 2011:1). Telle comme l'eau est une ressource stratégique et structurelle pour le processus productif du vin, ainsi l'est aussi l'électricité pour l'IPM, ce qui a mené à

¹¹ in Menezes et al, 2010

considérer l'étude importante une fois qu'elle a été mise en place dans le contexte productif de l'Esporão S.A..

Jorge (2011) a vérifié que, dans la période de 2003-2009, les ratios entre consommation d'eau dans le processus productif et la quantité de litres de vin produits dans l'entreprise avaient une valeur moyenne de 3 points par litre d'eau consommée vs litres de vin produits, loin des 0.75 produits en France et en Italie.

Ainsi, l'étude a pour objectif central identifier en quels moments du processus productif peut-on réduire la consommation d'eau, afin d'être possible adopter des solutions éco-efficientes pour améliorer la compétitivité de l'entreprise et pour développer un processus qui ait un moindre impacte dans l'environnement. Après avoir identifiées les activités (20% du total) dans lesquelles étaient utilisées 80% de l'eau consommée, quelques changements ont été suggérés dans le processus de stérilisation des bouteilles, dans les temps des activités et dans les équipements utilisés, par exemple, suite à quoi les résultats ont été mesurés.

L'analyse des ratios de consommation d'eau par litre de vin produit permet de constater qu'il s'est vérifié une réduction de la consommation concernant la période de 2006-2009, même si elle n'atteint pas encore les valeurs présentées par les autres pays, comme il a été dit.

Selon Jorge (2011:8), il peut être conclu que non seulement il est très important de voir la consommation d'eau comme un facteur important pour le développement durable de l'entreprise, ainsi comme réduire ces consommations car *“les opérations et l'efficience du processus sont importantes pour la soutenabilité économique et environnemental business”*, c'est pourquoi l'Esporão S.A. ira adopter une même méthodologie pour la consommation d'énergie pendant le processus productif de façon à le rendre plus efficiente.

Il est important de souligner que l'étude développée par Jorge (2011) à Esporão S.A a impliqué la détection de lacunes dans le processus productif et le développement de stratégies pour minimiser les coûts de fonctionnement à travers la réduction de la consommation d'eau, ce qui a contribué pour la durabilité économique et environnemental de l'entreprise. Par la suite, l'étude de cette dissertation prétend vérifier dans quelle mesure l'optimisation du processus productif, à travers l'utilisation

d'un processus de fraisage durable, permet de rentabiliser la main d'œuvre disponible et réduire la consommation d'énergie, contribuant pour la durabilité économique et environnementale de l'entreprise.

5.3 Le concept d'optimisation

Mathématiquement, le concept d'optimisation fait référence à l'étude de problèmes où il est recherché les extrêmes (minimums et maximums) d'une fonction, à travers d'un choix systématique de valeurs de variables réelles ou entières, dans un ensemble variable (Ravindran, Ragsdell e Reklaitis, 2006).

De cette façon, les mathématiciens considèrent que, dans n'importe quel problème d'optimisation, il existe deux questions générales (statique et dynamique) qui doivent être posées et, par conséquent répondues, étant les suivantes :

- Comment peut-on affirmer que le point X est une solution optimale? (question statique);
- Si X n'est pas la solution optimale du problème, alors qu'elle est-elle ? (question dynamique) (Ravindran *et al*, 2006).

Sun e Yuan (2006) affirment qu'à partir de l'exploration de possibilités théoriques, il s'agit de restructurer un « problème » précis recherchant la meilleure décision possible dans des conditions réelles avec l'objectif d'obtenir le plus haut rendement possible, créant ainsi les conditions les plus favorables à la solution qui, parmi toutes les solutions possibles, conduit aux résultats les plus satisfaisants.

Dans cette étude, il est proposé un fraisage durable qui permet trouver une alternative à l'actuel « point X » (question dynamique), c'est-à-dire diminuer les temps d'usage sans que ça va diminuer la qualité finale du produit (zone moulante du moule).

5.4 Le processus productif de l'Industrie Portugaise des Moules

L'étude de cette dissertation retombera sur la section de fraisage, pendant l'exécution du noyau et de la matrice du moule. Le fraisage est une des opérations d'usinage du moule, faisant appel à des outils avec plusieurs arêtes de coupe disposées régulièrement autour d'un axe de rotation (Sun e Yuan, 2006).

Pour l'IPM, le fraisage est considéré comme le « cœur » du processus productif de l'industrie des moules car la plupart des pièces passe par cette section. Comme l'affirment Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997:325) « *la forme plus rapide et économique de produire des moules est par le processus direct du fraisage comparativement à la technologie de l'érosion* ». Par conséquent, optimiser le processus productif dans cette phase ira permettre à l'entreprise d'augmenter sa compétitivité et sa rentabilité.

Pour mieux comprendre le processus productif du moule et la localisation de la phase de fraisage, il est présenté la Figure 4. Il peut être vérifié que les sections sont intimement liées, soit par une relation séquentielle, soit par une relation parallèle. Seulement une coordination effective à partir de la spécificité du moule et de la structure de l'entreprise, notamment dans le secteur de la production, permet des résultats positifs.

Pour Sönmez *et al* (1999), le temps de production est constitué par la préparation de la machine, charge et décharge de celle-ci, ajustage au processus et avancées rapides, usinage et échange d'outil.

Cette étude se centre sur l'optimisation de la phase de fraisage à travers l'ajustement des paramètres de coupe (incrément axiale et radiale de l'outil) dans les zones de jointe des matrices et noyaux des moules, pour réduire les temps de simulation. Bieker (1991)¹² affirme que « *pour un usinage plus économique, une des condition préalable plus importante est avoir des conditions de coupe idéales* ». Les paramètres de coupe seront recueillis auprès de plusieurs sources : du logiciel utilisé, programmeurs et collaborateurs qui travaillent avec les CNC. Ce point est important parce que chaque pièce a une géométrie différente ce qui implique que tous les paramètres de coupe soient ajustés à la géométrie à usiner (Park et Kim, 1998; Hatna *et al*, 1998).

¹² in Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997:325)

Les paramètres de coupe efficaces pour le fraisage ont été un problème pendant presque un siècle et actuellement, plus que toujours, les paramètres optimaux de fraisage continuent à être une grande préoccupation pour la phase de production ayant une grande nécessité de les optimiser face à leur grande importance dans le monde actuel de la fabrication (Tolouei-Rad et Bidhendi (1996), Cefamol (1996), influençant directement les temps de production (base de cette investigation). Les paramètres de coupe à spécifier dans cette étude seront :

- incrément axial (déplacement en Z de l'outil, par niveaux) (ap) ;
- incrément radiale (déplacement latéral de l'outil) (ae).

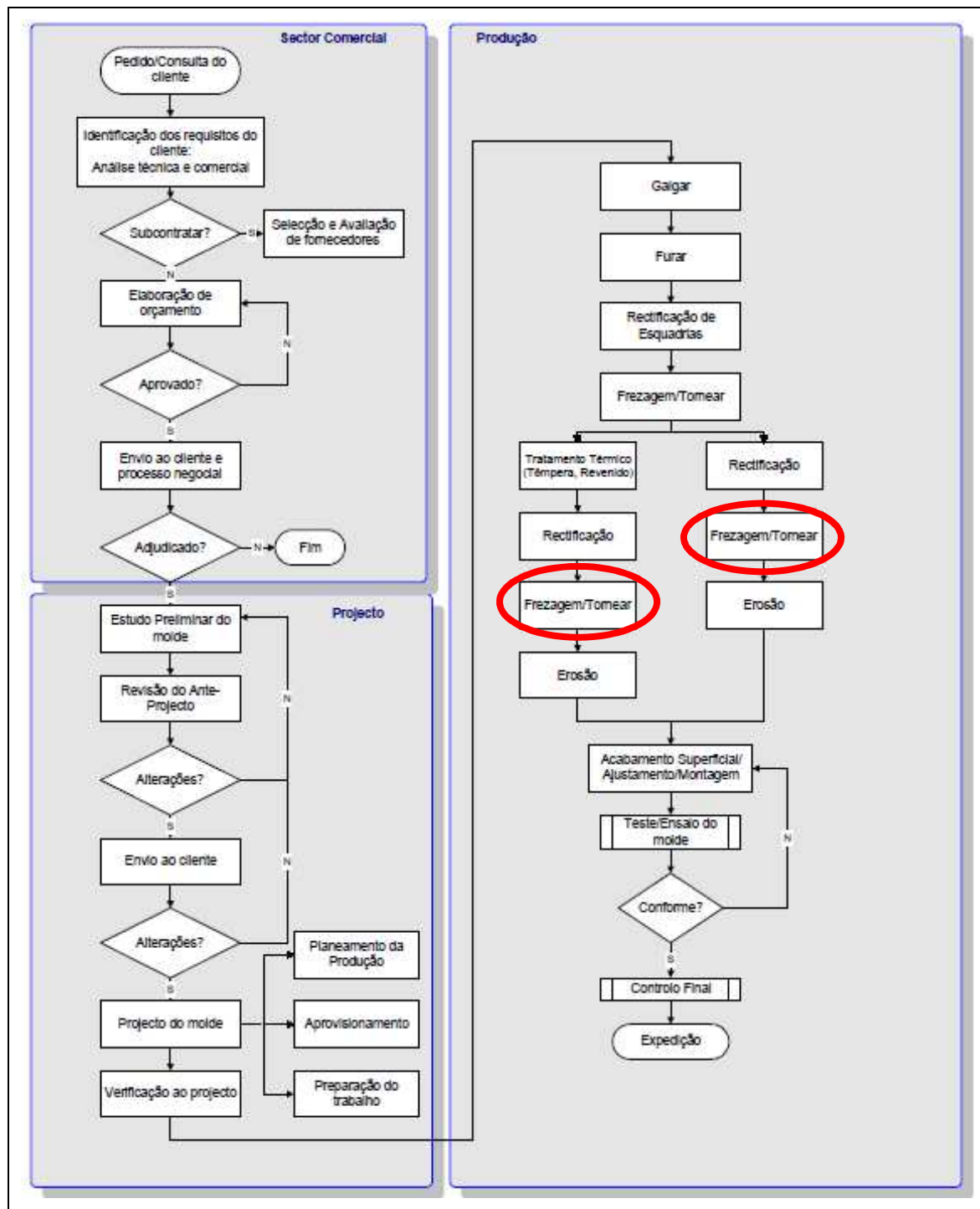


Figure 4 – Processus de conception et fabrication des moules

Source: Ferreira, 2001:34

Faisant appel aux deux facteurs au-dessus présentés, on peut arriver aux paramètres utilisés en CNC et, comme Agapiou (1992) défend, il existe trois paramètres fondamentaux pour l'optimisation de l'usinage en machine-outil CNC. Ces paramètres sont les suivants:

- rotation maximale (S) possible ;
- avance minimum (dans l'approchement outil-acier) et avance maximum (F) (en coupe) possible ;
- maximum incrément axial (a_p)/radiale (a_e) possible de la fraise au moment de la coupe.

Un problème fondamental observé dans l'application des paramètres de coupe recommandés par les fabricants est la différence entre les conditions que l'on obtient en laboratoire et les conditions réelles du travail. Les tests réalisés par les fournisseurs d'outils sont effectués dans des conditions optimales et ne sont pas adéquats pour la réalité de la fabrication des moules, c'est-à-dire, les tests sont développés dans un environnement contrôlé (température constante), avec des équipements adéquats à l'outil, par exemple, pendant que dans les entreprises la température n'est pas constante et, fréquemment, il est nécessaire adapter les outils disponibles dans le marché à l'ensemble des machines. Par conséquent, les programmeurs et opérateurs des CNC doivent baisser les valeurs des paramètres de coupe recommandées, s'adaptant aux conditions des équipements, outils, accessoires, entre autres. Selon Adamczyk (2004), le choix des paramètres de coupe détermine les résultats des tests des outils utilisés en production, qui peuvent être très semblables aux « réels » (conditions d'usinage), et il doit être pris en compte plusieurs critères comme l'usure de l'outil et les spécificités du processus d'usinage.

La *Tekniker IK4 Research Aliance* (2008) a réalisé une étude avec l'objectif de comparer les temps d'usinage conventionnel avec ceux de haute vitesse et ceux de haut rendement, faisant appel à un changement des paramètres de coupe utilisés, ainsi comme est présenté sur la Figure 5. Ce qui distingue les trois modèles d'usinage est la vitesse de coupe qui, en fin de compte, permet une amélioration dans les temps finals. Par exemple, le fraisage de haute vitesse a une vitesse de coupe 5 à 10 fois supérieure au fraisage conventionnel pour le même matériel.

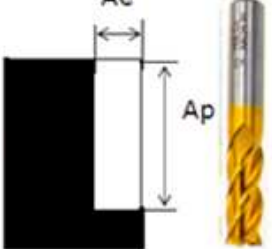
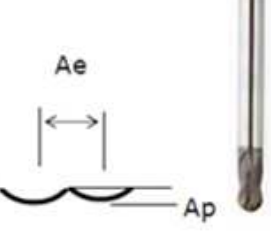
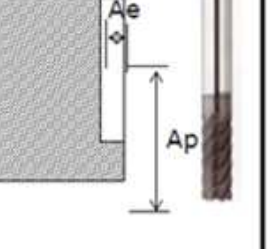
	Método convencional	Alta velocidade	Alto rendimento
R.P.M.	30-2.000	12.000-42.000	1.000-18.000
Avanço mm/min.	30-300	1.000-20.000	500-10.000
Prof. de corte (mm)	Ap:10-15 Ae:2-5 	Ap:0,3-4 Ae:0,3-1 	Ap:10-15 Ae:0,5-1 
Fresa Ø10mm			
Volume extraído	1-20 cm ³ /min.	1-60cm ³ /min.	1-150cm ³ /min.

Figure 5 – Paramètres de coupe de l’usinage conventionnel, de haute vitesse et de haut rendement

Source: *Tekniker* (2008)

Cependant, entre l’usinage de haute vitesse et celle de haut rendement sont énoncés d’autres différences en plus des déjà mentionnés paramètres de coupe (voir Tableau 3) qui peuvent influencer les temps d’usinage.

Tableau 3 – Différences entre l’usinage de haute vitesse et l’usinage de haut rendement

	Usinage de haute vitesse	Usinage de haut rendement
Magnitude portée	Rendement supérieur (cm ² /min)	Volume de coupe par unité de temps (cm ³ /min)
Programmation	Fraisage volumétrique 3D Surfaces complexes	Fraisage volumétrique 2D Facteurs déterminants ap, ae, fz
Capacité de la machine	Capacité de fraisage en 3D Haute vitesse d’avancement, dynamique, amortissement “construction légère”	Capacité de fraisage en 2D Force élevée de coupe, élevés par raideur et robustesse
Coupeau	Coupeau fin flottant et en forme d’aiguille	Volume élevé de coupeau
Domaines d’application	Estampage et finitions Construction de moules et outils de finition Fraisage de dégrossissage Structure de parois minces	Secteur aérospace Construction de moules et outils de dégrossissage Pièces plates et plaques Pièces cubiques et caisses Pièces en série en aluminium

Source: *Tekniker* (2008)

Dans l'usinage de haut rendement on peut obtenir des améliorations significatives car le volume de matériel enlevé augmente radicalement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, qui se traduit par l'avance de l'outil (mm/min)¹³. Malgré le taux élevé d'enlèvement de matériel, les forces de la coupe appliquées à l'acier, à travers l'outil, diminuent radicalement, car l'incrément (radial et axial) est aussi inférieur. En même temps, la qualité de surface usinée est améliorée. Comme dans toute technique, il existe aussi des aspects moins favorables comme est le cas de la vie utile de l'outil qui diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe car il souffre une plus grande usure (voir Figure 6).

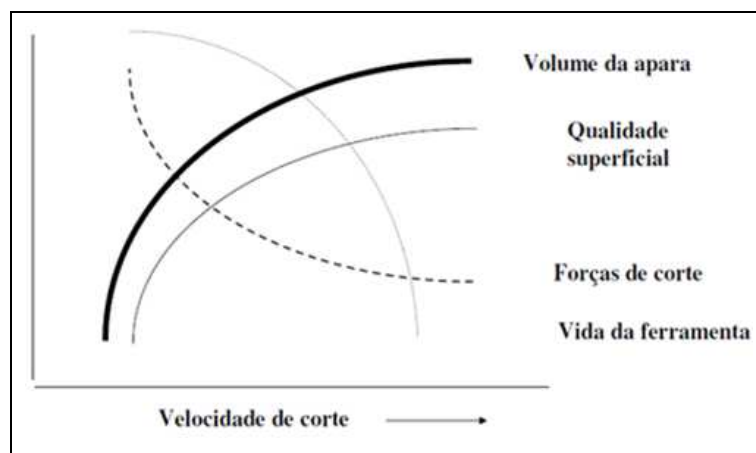


Figure 6 – Effets de l'incrément de la vitesse de coupe sur l'outil

Source: *Tekniker* (2008)

Ainsi, *Tekniker* a mesuré les temps de réalisation de différentes opérations, utilisant les trois formes d'usinage ci-dessus présentés (voir Tableau 4) et a conclu que l'usinage de haut rendement permet une réduction de temps dans l'ordre des 80% quand comparé avec l'usinage conventionnel.

¹³ mm/min (millimètre par minute) est l'unité de mesure de l'avancement de l'outil

Tableau 4 – Mesure des temps d’usinage – étude de *Tekniker* (2008)

	Usinage conventionnel	Usinage de haute vitesse	Usinage de haut rendement
Usinage d’ébauche	58 min	20 min	11 min
Usinage de reprise d’ébauche	28 min	26 min	26 min
Pré-finition usinage	5 H 30 min	5 H 30 min	13 min
Finition de rayons	11 min	11 min	3 min
Finition des plans	1 H 20 min	1 H 20 min	47 min
Finition des bitangences	24 min	24 min	10 min
TOTAL	8 H 46 min	8 H 11 min	1 H 50 min

Fonte: *Tekniker* (2008)

5.5 L’optimisation du processus productif dans l’Industrie Portugaise des Moules

L’organisation du processus productif est de plus en plus importante car, actuellement, les clients exigent des délais de livraison de plus en plus courts. De cette façon, il est essentiel réduire le temps de production, une fois que celui-ci peut influencer le respect des délais de livraison des moules.

Afin d’atteindre cet objectif, l’entreprise pourra adopter deux stratégies : investir en plus d’équipements ou, d’un autre côté, mieux utiliser les ressources disponibles dans l’entreprise. Mukherje e Ray (2005:18) ont affirmé dans un de leur articles que « *il n’existe pas une méthode unique pour l’optimisation du processus de coupe de métal* » c’est pourquoi dans cette étude, il a été choisi une stratégie durable de fraisage qui implique le changement des paramètres de coupe.

L’objectif est d’observer, modifier et mesurer les temps pendant une phase du processus productif du moule avec l’intention de le rendre plus rentable, non par l’investissement, mais par l’adoption de nouvelles formes d’exécution ; changer le processus d’usinage sans changer l’état final de finition de la zone moulante de la pièce, permettra maintenir la valeur ajoutée de la qualité de la finition, une caractéristique de l’IPM, et en même temps réduire la consommation de ressources, notamment les énergétiques. De cette

façon, il est important identifier les plus grands problèmes dans la précision de l'usinage qui, selon Weinert, Enslemann et Friedhoff (1997:325) sont la « *faible fiabilité du processus due à la variabilité entre les conditions de coupe spécialement dans la pré finition ; les forces de coupe provoquent la flexion de l'outil qui, à son tour origine de légères déviations provoquant des imperfections sur la superficie fraisée* ».

Pour résoudre les problèmes identifiés, Weinert, Enslemann et Friedhoff (1997:325) présentent comme solution « *l'adaptation de la vitesse de coupe à la rotation faisant appel à des logiciels appropriés* » et la possibilité de « *compenser la déviation/flexion de l'outil et la compensation de l'outil* ». Ainsi, la pièce utilisée pendant la simulation (voir Figure 7) réalisée par Weinert, Enslemann et Friedhoff (1997:326) « *est constituée par des surfaces avec un niveau élevé d'inclinaison et des zones plates. Les outils utilisés ont été des fraises sphériques et fraises plates. L'usinage a été effectué faisant appel à un logiciel (non spécifié) qui crée des parcours de l'outil optimisés* »

Par l'analyse de la Figure 7 on peut observer, à travers la légende, que des différences sont obtenus entre le dessin 3D (image B) et la pièce usinée (image A). Ces disparités se doivent au fait de l'outil fléchir en contactant avec l'acier (pendant le fraisage) causant l'usure, ce qui provoque de petites modifications géométriques réelles (qui n'existent pas dans un dessin 3D), soit par excès, soit par défaut relativement à la valeur nominal du modèle tridimensionnel.

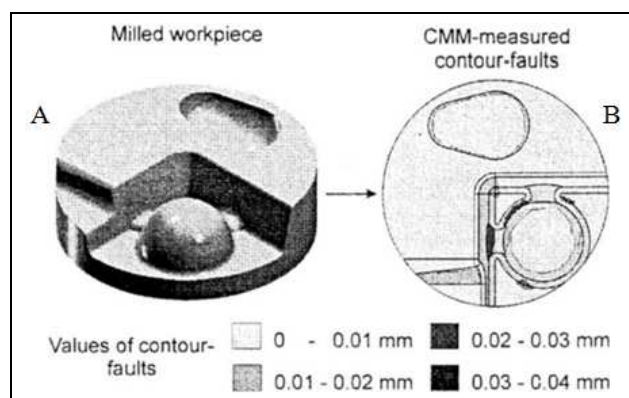


Figure 7 – Pièce utilisée par Weinert, Enslemann et Friedhoff (1997) pour les simulations contenant les déviations provoquées par l'outil après l'expérience

Source: Weinert, Enslemann et Friedhoff (1997:326)

Les conditions d'usinage utilisées par Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997:326) ont été « exécutées à une température normale, acier avec une dureté utilisée pour des moules (1600 N/mm^2) et usiné directement sur l'acier avec une technologie d'usinage de haute vitesse (HSC - High Speed Cutting) ». Les résultats obtenus par Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997) pendant l'usinage relativement à la géométrie 3D indiquent que le résultat optimum est compris entre 0,02 et 0,04 mm d'écart, ce qui indique que l'outil est soumis à des forces de coupe qui provoquent sa flexion, résultant dans une coupe ou par excès, ou par défaut. Les auteurs affirment aussi que pour atteindre des résultats satisfaisants au niveau de la finition de surface usinée (valeurs compris entre les 0,02 et 0,04 mm), le ratio hauteur/diamètre de l'outil ne peut pas excéder la valeur de 5, une fois qu'en utilisant des outils élevés (pour des usinages profonds) les résultats de finition de surface sont moins satisfaisants. En ce sens, il est déduit qu'il faut utiliser un ratio hauteur/diamètre de l'outil différent de 5.

La capacité d'optimiser les ressources humaines de l'entreprise permet que celle-ci ait des bénéfices, ainsi comme son client, une fois que celui-ci sera satisfait avec le respect des délais (augmentation de la compétitivité) et le fabricant rentabilisera les ressources de l'entreprise. La meilleure gestion de certaines ressources, notamment la main d'œuvre et l'énergie, permettra livrer le moule que le client désire, avec un coût de production plus bas dû à l'organisation efficiente du processus productif, à la diminution du temps d'exécution du travail et à une plus grande efficacité de la consommation énergétique, entre autres facteurs. Selon El-Haggar (2007), en diminuant les coûts de production l'entreprise pourra maintenir le prix de vente du moule, arrivant à augmenter le profit provenant de celle-ci et, au même temps, diminuer l'impact environnemental de l'organisation en minimisant différentes consommations (comme énergie et consommables). D'un autre côté, elle pourra inclure dans le moule un service qu'elle ne pouvait pas offrir jusque-là, à savoir une plus grande réduction dans les délais de livraison tout en maintenant la qualité et en augmentant la durabilité économique et environnementale de l'entreprise. Ces transformations mènent à une croissance de la satisfaction des fournisseurs, collaborateurs et clients, avec une meilleure performance environnementale et sociale et une augmentation des profits (Epstein, 2008).

La consommation d'énergie et sa répercussion dans les coûts de production sont un défi pour les entreprises et, par conséquent, la réduction des temps productifs assume une importance particulière une fois qu'elle influence directement le coût de production et la

consommation d'énergie de la part de l'entreprise. Il est encore important de souligner que la réduction de la consommation d'énergie permet une diminution directe de l'émission de dioxyde de carbone (CO₂).

Le 26 janvier 2012, l'INE a présenté les résultats de l'industrie de 2010 concernant le niveau d'énergie consommée dans l'industrie manufacturière, dans laquelle s'inclue l'IPM. Comme l'indique la Figure 8, il s'est vérifié une diminution générale de la production de dioxyde de carbone (CO₂) pendant la période de 2006-2009.

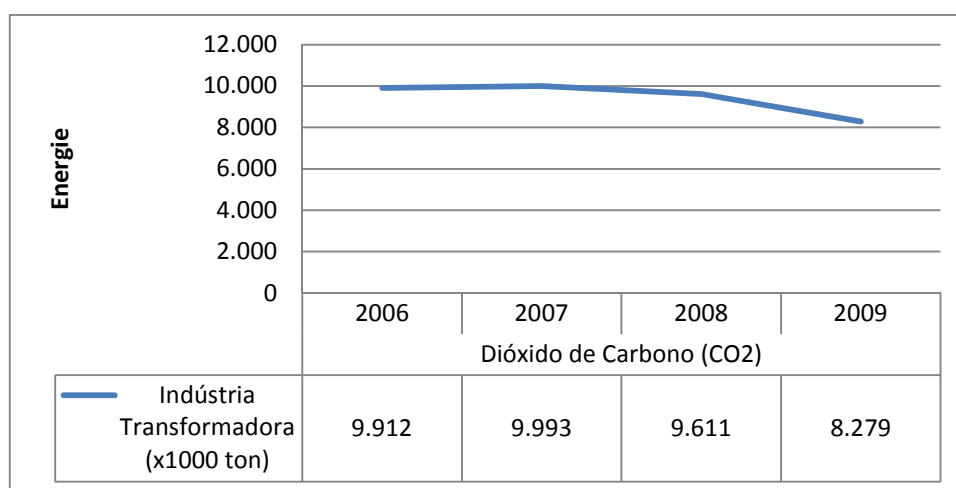


Figure 8 – Emission de dioxyde de carbone (CO₂) de l'industrie manufacturière

Source: INE, Rapport Statistique de l'Environnement 2010, publié en 2012 (INE, 2012)

Allant à l'encontre de la demande faite internationalement par l'ONU (2011a) concernant l'insuffisance des ressources naturelles, la Stratégie National pour l'Énergie (ENE 2020) a pour « *objectif promouvoir l'efficiencia energética, consolidant l'objectif de reducción de 20% de la consommation d'énergie finale en 2020* » (INE, 2012:25). L'optimisation du processus productif dans le secteur des moules permet que les entreprises contribuent pour l'efficiencia energética, ce qui permet non seulement « *la reducción des emisiones par le secteur energético* » (INE, 2012:25), comme « *la durabilidad ambiental del sector energético* » (INE, 2012:25) et l'incrément de la durabilidad ambiental et financier de l'IPM.

Il est importante de souligner que, selon l'INE (2012), pendant la période de 2006 à 2009, l'industrie (de façon générale) a consommé 27% de la production d'énergie électrique, ce qui montre une décroissance de 15 % due à la diminution de l'activité

industrielle résultante de la crise économique mondiale qui a débuté fin 2008 (voir Figure 9).

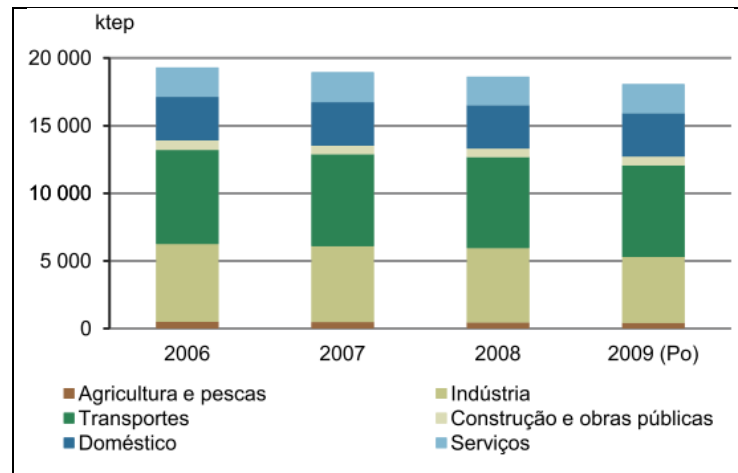


Figure 9 – Consommation d'énergie finale par secteur d'activité

Source: INE, Rapport Statistique de l'Environnement 2010, publié en 2012 (INE, 2012)

6 Hypothèses

En nous appuyant sur la revue de la littérature, les questions de départ et les objectifs proposés, il est prétendu tester les hypothèses suivantes, à savoir :

H1 – Le fraisage durable influence directement les temps du processus productif.

H2 – Le fraisage durable permet de diminuer le temps homme/machine.

H3 – Le fraisage durable permet de diminuer la consommation d'énergie électrique.

H4 – Le fraisage durable permet de diminuer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

H5 – Le fraisage durable est également applicable à des moules de différents tonnages.

H6 – La zone non projetée de la zone de jointe influence les temps du processus productif.

7 Modèle de recherche

Cette recherche a été construite autour de différents concepts, rendus opérationnels entre eux. Ainsi, il a été construit un modèle de recherche :

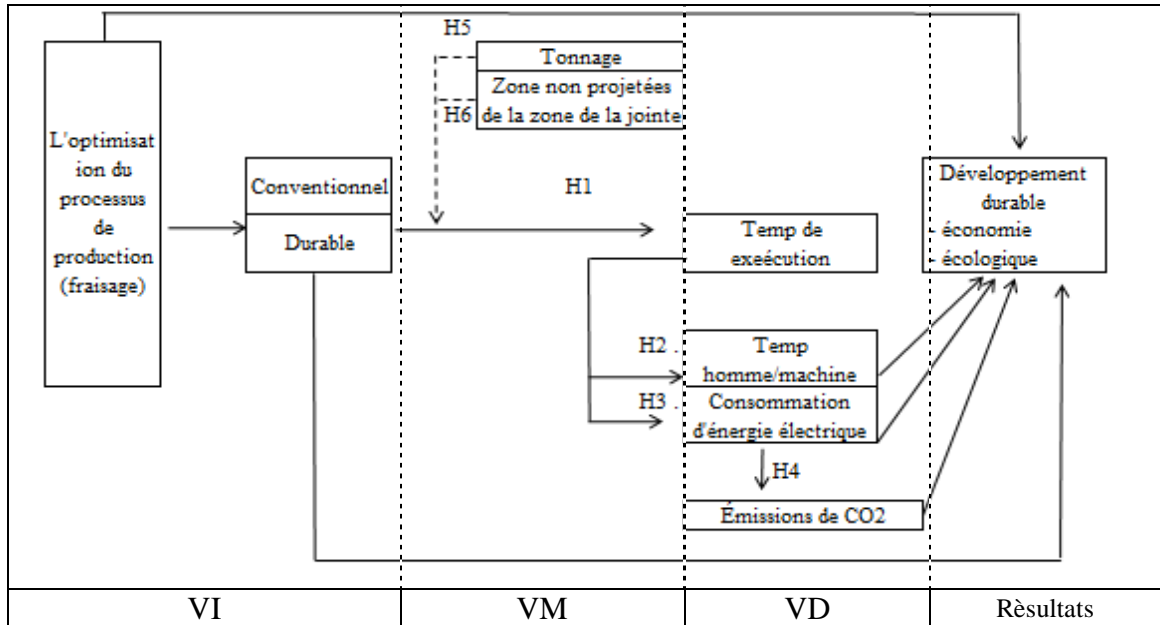


Figure 10 – Modèle de recherche

Propre source

PARTIE II

Dans cette deuxième partie il est expliqué le processus de construction de la recherche dans tous ses moments : collecte d'informations, modèle de recherche choisi, population à qui est destiné, construction de l'échantillon, caractérisation de l'entreprise où s'est déroulé l'étude, les variables et les groupes de contrôle et expérimental, recueil et définition des paramètres de coupe, le modèle de simulation par ordinateur, le logiciel utilisé, et finalement, la validité interne et externe de l'étude.

8 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Chaque travail de recherche exige une méthodologie spécifique avec l'objectif de fournir à l'investigateur un chemin défini pour atteindre ses objectifs, améliorant ses connaissances. Ainsi, il sera caractérisé le contexte où l'étude s'est développée et sera expliquée la méthodologie qui permettra les résultats à présenter.

8.1 Collecte d'information : données primaires et secondaires

Selon Silva (1981), l'utilisation d'ordinateurs permet atteindre une plus grande précision car on parvient à un meilleur stockage de modèles de simulation, bien comme à une plus grande flexibilité dans la construction de ces modèles et de la programmation effectuée sur le logiciel, c'est pourquoi ils furent le moyen défini pour obtenir les données primaires.

L'information primaire est caractérisée par le fait de ne pas exister encore avant de se développer une recherche une fois qu'elle est créée spécifiquement pour elle. Dans ce cas concret, les données primaires seront obtenus par simulation, avec l'objectif de valider, ou non, les hypothèses à tester à la fin de l'étude. Pour cela, ces simulations iront se faire dans une entreprise de moules de *Marinha Grande, Leiria, Portugal*.

Dans cette recherche, il a été mis en évidence non seulement la façon comme l'information a été obtenu mais aussi sa qualité. Ainsi, la sélection de l'information fut faite en prenant en compte son actualité, précision et pertinence une fois qu'il est considéré comme information secondaire toutes les données qui existent et qui sont disponibles pour être utilisées. Dans ce contexte, d'autres recherches ont été consultées ainsi comme des articles scientifiques, des œuvres scientifiques, des revues de la spécialité comme « Le Moule » et autres informations pertinentes pour cette recherche.

Il est important de souligner que pendant tout le processus de collecte d'information, nous ne sommes pas parvenu à trouver des études empiriques semblables à celui-ci dans le secteur des moules.

8.2 Type de Recherche

Avec cette dissertation, il se prétend comparer les temps de simulation du fraisage conventionnel avec les temps de simulation du fraisage durable (à développer dans cette étude). Pour arriver à cet objectif, l'investigateur va s'engager vers une recherche expérimental du genre prédictive de causalité (Fortin et Filion, 2006; Sampieri, Collado et Lucio, 2006), car il se prétend qu'une variable produise un effet sur une autre (Fortin et Filion, 2006; Sampieri *et al*, 2006).

Ainsi, il sera utilisé une population d'éléments sur lesquels ira se pencher l'étude et se mesurer les effets des variables définis.

8.3 Population

La population étudiée pour cette dissertation est constituée par les moules pour injection de plastique produits dans l'entreprise où s'est déroulé la recherche pendant un intervalle spatio-temporel situé sur l'année de 2010. Il a été choisi ce groupe de moules pour deux raisons :

- selon la direction, l'année 2010 fut une année représentative de l'activité de l'entreprise ;
- l'entreprise produit des moules pour différents secteurs, ce qui nous mène à un marché complet quant aux modèles de moules et tonnage.

De cette façon, la population-cible (56 moules) utilisée dans cette recherche fut toute la production de moules pour injection de plastiques de l'année de 2010, d'une entreprise de *Marinha Grande*. Cependant, l'étude porte sur un total de 112 pièces, une fois que chaque moule possède un noyau et une matrice respectivement, ainsi la simulation d'usinage porte sur 56 noyaux et 56 matrices.

En ce sens, à chacun des moules sera attribué un numéro-séquence pour mieux identifier la phase des résultats, c'est-à-dire, à la matrice du premier moule sera

attribuée 1C et au noyau respectif sera attribué 1B. De cette façon, nous saurons toujours de quelle pièce il s'agit (matrice ou noyau) et de quel moule.

Par la suite il est expliqué la façon comme s'est construit l'échantillon pour cette recherche.

8.4 Échantillon

De façon à homogénéiser la population-cible par dimension de moule (tonnage), avant l'étude proprement dite il a été effectué un accouplement en blocs par dimensions de moules (tonnage) (Fortin et Filion, 2006), une fois que les auteurs cités laissent l'option de pouvoir se faire avant ou après l'étude. Comme les blocs de l'accouplement ont des tailles différentes, il a été effectué un échantillonnage aléatoire avec chaque strate proportionnel à la taille de la population, permettant « à l'investigateur d'utiliser un échantillon plus petit et obtenir le même degré de représentativité qu'avec un échantillon plus grand » (Fortin et Filion, 2006:317; Sampieri *et al*, 2006). L'échantillon en étude est constitué par 36 moules (numéro maximum qui a été établi comme étant possible d'être analysé à travers la simulation, compte tenu la période de temps disponible pour la réalisation de la dissertation, organisés en strates (ou classes) par tonnage, dont la quantité de moules pour chaque strate fut calculé sur la base de la proportion de l'échantillon vis-à-vis de la population, de façon à contrôler les effets de cette variable médiatrice.

Comme l'Association National de l'Industrie des Moules (*Cefamol*) ne possède pas une échelle de dimensionnement des moules, Rodrigues (2002:169) en a créé une lors de sa thèse de doctorat, fondée sur des entretiens effectués à 63 dirigeants de haut niveau de l'IPM. L'unité de base pour la classification de la dimension des moules sera la tonne (Ton). Ces classes sont représentés sur le Tableau 5.

Tableau 5 – Classes de dimensions des moules VS désignation du type de moule
(unité Tonne)

Dimension (Ton)	Désignation du type de moule
]0 ; 0,25]	Très petit
]0,25 ; 0,75]	Petit
]0,75 ; 2]	
]2 ; 5]	Moyen
]5 ; 10]	
]10 ; 20]	Grand
]20 ; ∞[	Très grand

Source: Rodrigues (2002:169)

Les moules de la population étudiée ont été classés selon les données qui figurent sur le Tableau 5, ce qui permet de stratifier tous les moules compris dans l'étude (voir Tableau 6).

Tableau 6 – Distribution du n. ° d'éléments à analyser dans chaque strate

Dimension (Ton)	Éléments (Nh) ¹⁴
]0 ; 0,25]	3
]0,25 ; 0,75]	7
]0,75 ; 2]	23
]2 ; 5]	9
]5 ; 10]	8
]10 ; 20]	3
]20 ; ∞[	3
Total (N)	56

Propre source résultante de l'étude

¹⁴ Nh est la valeur stratifiée, c'est à dire, est le numéro d'éléments effectif à analyser dans chaque strate

A partir de la taille de l'échantillon, il a été nécessaire de trouver un facteur (sh) qui puisse homogénéiser la quantité de pièces à retirer de chaque strate de façon à avoir une représentativité égale dans tous les strates (Fortin et Filion, 2006), une fois que « *La stratification augmente la précision de l'échantillon et implique l'utilisation délibérée de différentes tailles de l'échantillon pour chaque strate* » (Sampieri et al, 2006:259).

Avec cette pondération (proportion à utiliser en chaque strate – sh), la probabilité d'obtenir un échantillon (de moules) représentatif augmente, Amyotte (1996)¹⁵. Ainsi, l'Equation 1 présente le mode de calcul pour trouver le facteur de proportionnalité cité, dans laquelle N est la taille de la population et n est la taille de l'échantillon utilisé.

Equation 1 – Proportion à utiliser dans chaque strate (sh)

$$sh = \frac{n}{N} = \frac{36}{56} \cong 0,64$$

Après avoir calculée la proportion à utiliser dans chaque strate ($sh = 0,64$), l'échantillon de chaque strate (nh_i) a été calculé, en recourant à la multiplication entre proportion (sh) calculée dans l'Equation 1 et la valeur stratifiée initialement (Nh_i) présentée dans le Tableau 6, c'est à dire, le numéro d'éléments effectifs à analyser.

Equation 2 – Taille de l'échantillon pour chaque strate i (nh_i)

$$nh_i = sh * Nh_i, i=1, 2, \dots, 7.$$

Après avoir trouvé le numéro défini de moules à simuler par strate (nh_i), il a été ajouté toutes les valeurs résultantes de l'Equation 2 de façon à constituer l'échantillon de la recherche (n), soit,

Equation 3 – Taille de l'échantillon probabiliste stratifié (n)

$$n = \sum_i nh_i, \text{ pour chaque strate } i (i=1, 2, \dots, 7).$$

¹⁵ in Fortin et Filion (2006)

Le Tableau 7, à la suite du Tableau 6, montre les résultats provenant de l'Equation 1, Equation 2 et Equation 3.

La taille de l'échantillon stratifié utilisé dans cette recherche est $n = 36$ moules (36 matrices e 36 noyaux), pour un total de 72 pièces.

Après avoir trouvé la taille de l'échantillon pour chaque strate i (nh_i), l'investigateur a choisi aléatoirement les représentants de chaque classe à incorporer l'échantillon issue de l'Equation 3 (échantillon probabiliste stratifié n) et qui sont sur le Tableau 7. À cela il est appelé échantillonnage aléatoire stratifié, car tous les éléments de toutes les classes ont la même probabilité de faire partie de l'échantillon, en renforçant la représentativité de celle-ci (Fortin et Filion, 2006). Les valeurs obtenues pour chaque échantillon de chaque strate (nh_i) ont été arrondis selon la procédure habituelle.

Tableau 7 – Classes de dimensions des moules (unité tonne) avec échantillons par strate

Dimension (Ton)	Éléments (Nh)	Pourcentage d'éléments de l'échantillon face à la dimension de la population (sh)	Échantillon par strate (nh)
]0 ; 0,25]	3	0,64	2
]0,25 ; 0,75]	7		4
]0,75 ; 2]	23		15
]2 ; 5]	9		6
]5 ; 10]	8		5
]10 ; 20]	3		2
]20 ; ∞ [3		2
Total (N)	56		36

Propre source résultante de l'étude

En prenant pour base les résultats de l'étude pour l'échantillon de 36 moules (voir Tableau 7) il a été estimé la valeur de l'écart-type de la population à partir de la valeur de l'écart-type de l'échantillon, de façon à calculer une estimation pour le niveau de précision des résultats. De façon à que le niveau de confiance soit élevé, l'investigateur a travaillé avec un degré de 95 % et a été utilisé la formule de calcul présenté par Daniel et Terrell (1995), comme l'est décrite par l'Equation 4 (voir ci-dessous Échantillon).

Une fois que l'étude effectuée retombe sur les 36 moules constitués par leurs matrices et noyaux, il est présenté dans le chapitre ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS (voir Fraisage) une estimation pour les temps d'exécution des deux, à partir de l'Equation 4.

Equation 4 – Précision de l'estimation des différences des temps de simulation

$$d = Z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{N-n}{N-1}},$$

où:

d - Niveau de précision de l'estimation du temps obtenu d'après l'échantillon, c'est-à-dire, l'écart (ou l'erreur) maximum de l'estimation de temps obtenu avec l'échantillon face au temps qui s'obtiendrait avec la population.

Z - Valeur de la distribution Normal standard correspondant au degré de confiance désiré. Dans cette étude l'intervalle de confiance est de 95%, c'est pourquoi nous avons une valeur correspondante pour Z de 1,96.

σ – Écart - type de la population (valeur à estimer tenant en compte les résultats de l'étude pour l'échantillon de 36 moules).

n - Dimension de l'échantillon (36 moules).

N - Dimension de la population (56 moules).

8.5 Caractérisation de l'entreprise où s'est réalisé l'étude

En 2010 (période pendant laquelle a commencé cette recherche) l'entreprise où s'est réalisé l'étude a obtenu la certification NP EN ISO 9001:2008 par la TUV (Technischer Überwachungs-Verein – entreprise allemande de prestation de services et certifications) et a facturé 3,5 millions d'euros avec la fabrication de 56 moules.

Le parc de machines de l'entreprise en 2012 était constitué par 9 fraiseuses CNC (où s'incluent les centres d'usinage de 3 et 5 axes), 3 fraiseuses conventionnelles, 3 tours, 6 rectifieuses, 5 érosion de pénétration, 1 érosion de fil, 2 aléseuses, 2 CNC de perçage profond (une de 3+1 axes et l'autre de 3+2 axes). Actuellement, l'entreprise emploie 63 collaborateurs.

8.6 Procédures pour la simulation

Faisant appel à un logiciel de programmation de fraisage (création du parcours de l'outil pour machines CNC) utilisé tous les jours dans l'entreprise, il se prétend simuler deux modèles de fraisage.

Pendant la revue de la littérature effectuée par l'investigateur, il n'a pas été trouvé d'études semblables à ce qu'il est prétendu faire (voir chapitre 5.5), ainsi il a été défini deux concepts, de façon à clarifier les procédures adoptées pendant l'étude, à savoir : simulation/fraisage conventionnel et simulation/fraisage durable.

La **simulation/fraisage conventionnel** convenue dans cette étude est vue comme étant le modèle de simulation/fraisage qui se fait actuellement – le même modèle d'usinage de la zone moulante et de la jointe.

La **simulation/fraisage durable** convenue dans cette étude est vue comme étant le modèle de simulation/fraisage qui se prétend présenter – implique une différenciation de finitions entre la zone moulante et la zone de la jointe. Avec ce modèle de fraisage, l'incrément axial et/ou radial augmentera selon l'opération de finition.

Ces simulations seront effectuées sur les matrices et les noyaux de l'échantillon sélectionné à partir des 56 moules (de différentes dimensions/tonnage) produits dans l'entreprise pendant l'année de 2010.

Pour atteindre les objectifs proposés (voir chapitre 3.1), des simulations seront faites en ordinateur de façon à comparer les temps des simulations conventionnelles et durables. Pour cela, il sera fait appel à un logiciel d'usinage (voir chapitre 8.11), qui est utilisé tous les jours dans l'IPM.

Il a été choisi cette méthode pour la collecte de données (simulation), une fois que, selon Silva (1981), la simulation utilisée en contexte de recherche prétend déterminer les valeurs optimales des paramètres qui décrivent le processus en étude, permettant une approche plus réaliste et précise du problème. Ainsi, comme Weinert *et al* ont fait en 1997, les pièces simulées dans cette dissertation ont aussi des surfaces « avec des degrés d'inclinaison et zones plates élevés », dans lesquelles seront utilisés des outils sphériques et toriques (voir Tableau 8), faisant appel à un logiciel « qui crée des parcours d'outil optimales » (WorkNc).

La Figure 11 illustre une matrice ou noyau avec la séparation des zones moulantes (numéro 1) et de la jointe (numéro 2). Quelques moules pourront avoir une ou plusieurs matrices moulantes, c'est pourquoi deux zones sont présentés avec le numéro 1.

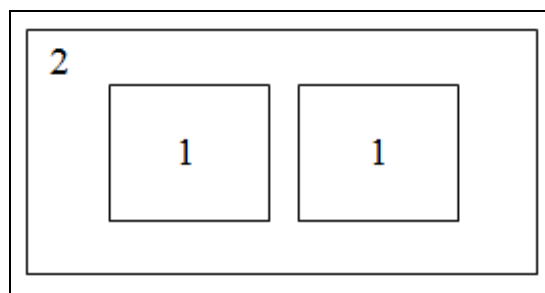


Figure 11 – Identification de la zone moulante (1) e de la zone de jointe (2) d'un moule

Propre source

Pendant l'usinage, beaucoup de programmeurs ne distinguent pas la zone moulante (numéro 1 de la Figure 11) de la zone de la jointe (numéro 2 de la Figure 11), effectuant seulement une fenêtre d'usinage ou un usinage mixte (la même fenêtre contient une partie de la zone moulante et une autre de la zone de jointe), ce qui conduit à un fraisage unique. De cette façon, la zone de jointe maintient le même niveau de qualité de la zone moulante. Ce genre d'approche est appelée simulation/fraisage conventionnel, telle comme l'a été décrite.

Le fraisage (durable), proposé dans cette dissertation consiste dans l'utilisation de deux fenêtres d'usinage, de façon à maintenir le traditionnel niveau de finition pour la moulante (première fenêtre d'usinage – numéro 1 de la Figure 11), lors que dans la deuxième fenêtre d'usinage (numéro 2 de la Figure 11) il se prétend une finition d'un bon niveau mais de qualité différente de celle effectuée lors de la première fenêtre (augmentant le passage latéral ou axial, en conformité avec l'opération). De cette façon, « l'âme » du moule est la zone moulante, pendant que la zone de jointe a comme fonction délimiter et supporter la force de la fermeture du moule.

La dénommée « ligne de jointe du moule » (ligne imaginaire par où le moule est ouvert) permet la séparation de la matrice et du noyau et le 'démoulage' de la pièce de plastique. Pendant la phase de projet, la ligne de jointe est définie après la conclusion de la pièce en plastique et, par conséquent, c'est la complexité du démoulage de la pièce de plastique qui définira la complexité de la ligne de jointe, ce qui se reflète sur la ligne d'ajustement de la matrice et du noyau.

Pendant la phase de montage du moule (section de montage), les opérateurs doivent garantir que les zones de jointe du noyau et de la matrice s'approchent de façon à maintenir le même intervalle au long de toute la zone moulante. De cette façon, quand le plastique chauffé (liquide) est injecté, celui-ci ne sort pas de la zone moulante. Quand ces aspects techniques ne sont pas obtenus, la matière première envahit la zone de jointe, levant à une pièce avec bavures.

Même pour la plus parfaite des finitions de la zone de jointe, et du respect du fraisage par le 3D programmé, les collaborateurs du montage ont toujours la nécessité de les retoucher/affiner, de façon à garantir que les zones de jointe de la matrice et du noyau coïncident évitant ainsi des infiltrations. Comme les opérateurs de montage ont toujours la nécessité de retoucher/affiner les zones de jointe, celles-ci peuvent avoir une qualité de finition de surface différente de celle réalisée sur la zone moulante.

En somme, les programmeurs doivent maintenir la qualité de surface de la zone moulante, tel comme il est fait actuellement, et peuvent sacrifier la qualité de surface de la zone de jointe (comparativement à la zone moulante), augmentant les incréments radiaux et axiaux (selon l'opération de finition), de façon à diminuer les temps de fraisage.

Pendant tout le procès, le programmeur doit tenir en compte la qualité de la finition de la surface de la zone de jointe, de façon à que pendant la phase de montage (section de montage) les opérateurs n'aient pas une augmentation de leur travail dû à l'excès de matériel ou rugosité excessive dans les zones de jointe, par exemple.

Ainsi, les temps de simulation (conventionnels et durables) seront enregistrés par l'investigateur pour le même type de moule et ultérieurement comparés, de façon à déterminer de possibles différences de temps, avec la finalité d'optimiser le processus productif et permettre d'économiser dans l'utilisation des ressources.

Après l'obtention des temps, il est prétendu simuler pour savoir l'influence que ceux-ci ont concernant la consommation moyenne d'énergie par les équipements d'usinage, la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émis ou pas émis par la consommation d'énergie électrique, ainsi comme les heures d'homme-machine nécessaires à la matérialisation des simulations citées (conventionnelle et durable).

Les résultats obtenus permettront de tirer des conclusions et les confronter avec les questions et hypothèses avancées par cette étude.

8.7 Variables

Comme il l'a été dit, cette recherche est du type prédictif-causal, plus précisément du type expérimental, ce qui implique présenter la définition et opérationnalisation des variables.

Selon Tuckman (2000) et Fortin et Fillion (2006), la variable indépendante (VI) est l'élément qui est introduit, manipulé et sélectionné par l'investigateur de façon à déterminer sa relation avec le phénomène observé, c'est-à-dire, la variable dépendante (VD). La VI est modifiée par le chercheur de façon à évaluer son influence sur la VD, c'est à dire, elle est une cause nécessaire d'une conséquence déterminée ; c'est ce qui provoque un effet déterminé. Ainsi, ce qui est étudié est la façon comme ce facteur se reflète sur l'autre. Fortin et Fillion (2006:171) affirment encore que « *la variable indépendante, aussi appelée de variable expérimentale, est considérée comme la cause de l'effet produit sur la variable dépendante* ».

Tuckman (2000) affirme que la VD est le facteur observé et mesuré pour déterminer l'effet de la VI, c'est-à-dire que la VD « *est celle qui souffre l'effet de la variable indépendante ; c'est le résultat prédit par l'investigateur* » Fortin et Fillion (2006:171). Cette VD est aussi désignée par Fortin et Fillion (2006) de variable critère ou variable expliquée.

Dans cette étude, au-delà de la VI et de la VD, des variables médiatrices seront également définies (VM), une fois qu'il est considéré la possibilité de que celles-ci peut influencer la relation entre la VI et la VD ci-dessus présentés. La VM est une variable indépendante secondaire, sélectionnée pour déterminer si elle affecte la relation entre la variable indépendante essentielle et la variable dépendante (Tuckman, 2000):

« Si l'investigateur est intéressé par l'étude de l'effet de la variable indépendante X sur la variable dépendante Y, mais suspecte que la relation entre X et Y est modifiée par le niveau d'un troisième facteur Z, alors Z peut figurer, dans cette analyse comme une variable médiatrice » (Tuckman, 2000:126).

Dans ce contexte, il est considéré X (VI) les types de simulations (conventionnel et durable), Y (VD) le temps résultant de la simulation effectué, consommation d'énergie et ressources humaines et Z (VM) la dimension (tonnage) du moule, la zone de jointe du moule, la zone non projetée de la zone de jointe, la dureté de l'acier à usiner (2311, 2344, 2738, 2738HH, entre autres duretés), le parc de machines de l'entreprise, la géométrie de la pièce, entre autres facteurs, une fois qu'il se 'suspecte' que ces variables médiatrices affectent directement la relation entre variable indépendante et variable dépendante.

Les variables de contrôle (VC) sont « *des facteurs que l'expérimentateur contrôle, pour annuler ou neutraliser n'importe quel effet que, d'une autre façon, pourraient avoir sur le phénomène observé* » (Tuckman, 2000:129). C'est la raison pour laquelle, comme il a déjà été dit dans les Procédures pour la simulation, il sera seulement modifié entre les simulations, l'incrément axial (opération en niveau Z) et radiale (opération de finition plan parallèle) selon le type d'opération à effectuer, ne modifiant pas autre type de paramètre technique dans la programmation (rotation, avance, entre autres), de façon à neutraliser quelconque influence de ces facteurs sur les résultats de l'étude.

Les variables étrangères (VE) ou parasites « *sont présentes dans toutes les études et peuvent exercer un effet sur les autres variables et influencer ainsi les résultats d'une recherche* » (Fortin et Filion, 2006:172), c'est pourquoi, selon Fortin et Filion (2006), le rôle de l'investigateur est de réduire les effets de ces variables à leur minimum. Ainsi, l'investigateur a effectué les simulations (conventionnel et durable), de façon à diminuer l'effet des VE dans l'étude. Cependant, il existe beaucoup de facteurs qui influencent tous les jours l'usinage et les temps réels d'exécution, c'est-à-dire même que la matérialisation des programmes simulés (conventionnel et durable) s'effectuent dans les mêmes conditions (le même équipement, même collaborateur, même type d'outil, même période/saison de l'année, entre autres aspects), il existe toujours des anomalies qui sont inhérentes au processus et qui ne peuvent pas être contrôlés (VE), comme est le cas quand un outil se casse, l'usure de l'outil, la température ambiante, entre autres. Toutefois, malgré ce qui a été dit, des études comme celles-ci sont plus viables par la simulation car « *les expériences réelles sont plus chères que les Modèles de Simulations* » Figueiredo (2010:19).

8.8 Groupe de contrôle et groupe expérimental

Tuckman (2000:171) désigne le groupe de contrôle comme étant « *un groupe de participants dans une expérience déterminée dont la sélection et l'expérience sont le plus semblable possibles au groupe expérimental ou de traitement, à l'exception faite de ne pas être soumis à ce traitement* ».

Par opposition, il est sous-entendu que le groupe expérimental sera le groupe sur lequel retombera toute la manipulation de variables, pour que ce soit possible obtenir des résultats différents.

Malgré le fait des 36 moules choisis aléatoirement soient soumis à la phase de simulation, il a été décidé de désigner par groupe de contrôle celui dans lequel se fera la simulation conventionnelle, pour deux motifs qui sont liés :

- c'est la simulation qui actuellement s'utilise dans la production de l'entreprise où se déroule l'étude ;
- c'est celle-ci qui va être le point de départ pour arriver aux conclusions de l'étude.

Le groupe expérimental sera celui où se fera la simulation durable, autrement dit, sur lequel l'investigateur effectuera la manipulation de la VI (incrément axial et radial), pour qu'il s'obtienne des effets sur la VD (temps d'usinage).

8.9 Collecte et définition des paramètres de coupe

Dans la construction du programme de finition (NC - Contrôle Numérique), en recourant au logiciel CFAO *WorkNc*, l'investigateur a seulement modifié l'incrément radial (déplacement latéral de l'outil) utilisant une stratégie de finition par plans parallèles (opération où la trajectoire de l'outil accompagne le contour 3D) où ont été utilisés des fraises du type sphériques, et un incrément axial (en Z) en recourant à des stratégies d'usinage par niveaux où sont utilisés des fraises toriques avec rayon de coin.

Pour s'obtenir des paramètres de coupe plus optimisés en finition des zones de jointe, plusieurs sources ont été utilisées, comme mentionné auparavant : logiciel, programmeurs et opérateurs de CNC. De cette façon, le tableau suivant (voir Tableau 8) présente les valeurs que les programmeurs et opérateurs de CNC utilisent habituellement pour créer les programmes NC cités. Sur le tableau mentionné, il apparaît quelques espaces « sans valeur », ce qui est justifié par la spécificité de l'opération à utiliser dans l'usinage de ces pièces, c'est-à-dire, majoritairement les fraises sphériques sont utilisées dans les opérations de finition par plans parallèles, existant dans ce cas seulement l'incrément radial, tandis que les fraises toriques avec rayon de sont utilisées pour les programmes avec des incréments en Z, existant dans ce cas un incrément axial. Il sera aussi présenté des valeurs suggérées par le logiciel. Cependant, les valeurs pour l'incrément axial (en Z) devront être définies selon l'outil à utiliser, une fois que le logiciel ne fait aucune suggestion.

À partir des valeurs minimums (donnés des programmeurs et opérateurs de CNC) et des valeurs maximums (donnés du logiciel) sont suggérés les valeurs pour la construction des programmes avec une simulation durable (voir Tableau 8).

Tableau 8 – Synthèse des paramètres de coupe

Type de Fraise	Diamètre de la Fraise (mm)	Conventionnel		Logiciel	Soutenable	
		Radial (mm)	Axial (mm)	Radial (mm)	Radial (mm)	Axial (mm)
Sphériques	6	0,2	Sans Valeur	0,288	0,25	Sans Valeur
	8	0,25		0,332	0,3	
	10	0,25		0,372	0,3	
	12	0,25		0,4	0,4	
	16	0,35		0,47	0,5	
Toriques avec rayon de coin	6	Sans Valeur	0,1	Sans Valeur	Sans Valeur	0,15
	8		0,1			0,15
	10		0,15			0,2
	12		0,15			0,225
	16		0,15			0,25
	20		0,175			0,3
	25		0,175			0,3
	32		0,2			0,35
	35		0,2			0,35

Propre source résultante de l'étude

8.10 Modèle de Simulation par Ordinateur

Silva (1981:322) considère que « *la simulation peut être définie comme n'importe quelle tentative d'obtenir de l'information sur le processus par l'intermédiaire de la réalisation de calculs basés dans le modèle mathématique qui décrit le processus* » et Robinson (2004) considère la simulation comme une imitation (en ordinateur) d'une configuration de ressources, combinés pour fournir des biens et services. Cette perspective est aussi celle de Silva (1981:322), où « *l'obtention de l'information relative au processus ou système en étude est réalisé par l'intermédiaire d'un ordinateur et se traduit par l'identification, ajustement de l'étude, de ses caractéristiques, paramètres et comportements* ».

Allant plus loin, Silva (1981) ajoute que l'importance des modèles conceptuels décrits et analysés en termes mathématiques classiques fut influencée par les résolutions obtenus à travers l'utilisation de l'ordinateur, une fois que celles-ci possèdent plus de réalisme et permettent d'obtenir des solutions plus précises.

La méthode de simulation présente encore l'avantage très important de permettre « *des abordages empiriques basées en tentatives et échecs* » (Carvalho, 2007:7), c'est-à-dire « *même quand s'utilisent des programmes de simulation, il est fréquent recourir à cette méthode à travers la réalisation de simulations successives avec différentes valeurs pour les paramètres du processus* » (Carvalho, 2007:7). De cette façon, on arrive à appliquer différentes valeurs pour le même modèle tridimensionnel (fichier 3D), de façon à trouver la valeur optimale pour la pièce en cause.

Figueiredo (2010) affirme que les modèles de simulation peuvent faire face à des problèmes beaucoup plus complexes comparativement aux modèles mathématiques. De cette façon, la simulation peut s'appliquer à des situations hypothétiques et à des situations réelles (comme est le cas de cette étude), avec l'avantage d'être une alternative fiable et plus économique par rapport à la méthode expérimental :

« les expériences réelles sont plus chères que les Modèles de Simulation, spécialement en cas de problème. Même qu'il puisse prendre une quantité de temps considérable pour développer un modèle de simulation, une fois conclu, il permet au modulateur simuler des mois ou de années de comportement du système en secondes, ce qui n'est pas viable avec des expériences » Figueiredo (2010:19).

Le facteur économique est extrêmement important, car le secteur des moules produit un bien extrêmement coûteux ce qui rend impossible doubler l'usinage des zones moulantes (matrices et noyaux), sous les mêmes conditions (machine-outil, outils, opérateurs, conditions ambiantes – thermiques- entre autres). D'un autre côté, un moule est un outil prototype c'est pourquoi répliquer impliquerait un gaspillage, une fois que ce second moule ne serait pas utilisé.

Pour les raisons présentés précédemment, la simulation fut choisi pour la réalisation de cette recherche parce qu'elle est la plus adéquate, du point de vu de l'investigateur, pour la recueil des temps pour les différents usinages. Pour cette prise de décision, il est

important de souligner qu'avec la simulation, on peut ajuster les caractéristiques, paramètres (incrément axial ou incrément radial) et comportements (Silva, 1981) des outils aux stratégies utilisées (conventionnel et soutenable), de façon plus rapide (Figueiredo, 2010) et économique, comparativement à la matérialisation des simulations.

8.11 Logiciel utilisé

Le logiciel choisi pour la collecte de données (*WorkNc*) est un programme utilisé tous les jours par les entreprises de production de moules, ce qui fait la probe de la fiabilité des résultats à obtenir.

8.11.1 Méthodologie de développement du modèle de simulation

Pour travailler avec le logiciel *WorkNc* il est obligatoire un fichier 3D avec un format IGES (plus usuel) ou un autre format compatible car autrement, il ne serait pas possible importer le fichier pour la zone de travail du logiciel. Après l'importation, il faut effectuer la reconnaissance de la part du logiciel. Le deuxième pas sera délimiter les fenêtres de programmation, précisant les zones à usiner (zone moulante et zone de jointe).

En suite les données sont introduites pour que le logiciel puisse créer le parcours de l'outil. Pour cela, une fenêtre de compilation de programmes s'ouvre (Figure 12), ce qui correspond à une opération d'usinage, dans un endroit déterminé de la pièce, avec un outil déterminé et paramètres de coupe respectifs (incrément axial ou incrément radial selon les opérations), ainsi comme d'autres détails intrinsèques au processus/programme NC.

Face à la stratégie (ébauche, pré-finition, finition ou autre) à effectuer sur la pièce, en 1, il est défini l'opération ou le type de parcours prétendu (finition plans parallèles, par niveau Z, contour, tangente, entre autres), c'est-à-dire ce qui se prétend que l'outil exécute dans la CNC.

En 2 il est défini la zone d'usinage : il peut être choisi usiner dans l'axe Z ou dans un autre sens, comme est le cas des équipements qui travaillent en 3+1, 5 ou plus d'axes.

Malgré le fait de pouvoir indiquer toute la superficie de la pièce, le programmeur a la possibilité de choisir en 3 quelle zone spécifique veut il exécuter c'est-à-dire, on peut choisir usiner toute la superficie de la pièce ou bien, il est sélectionné une zone/ fenêtre d'usinage qui correspond à la fenêtre d'usinage créé initialement.

En 4 il est défini l'outil à utiliser dans l'opération choisi et celle-ci peut être un outil torique avec rayon de coin ou une fraise sphérique. Dans ce domaine, le programmeur pourra choisir un outil qui soit intégré dans la base de données de ce logiciel. Cette base de données contient quelques paramètres de coupe associés qui rempliront les boites 6,7 et 8 automatiquement. Au cas où l'outil à utiliser n'existerait pas dans la base de données, il pourra être introduit manuellement. Pour cela, l'opérateur devra remplir les boites 4, 6,7 et 8 de façon manuelle.

En 5 il est indiqué le sens de la coupe de l'outil relativement à l'acier, c'est-à-dire, l'outil coupe en faveur ou contre le matériel. Dans cette boite il peut être encore défini s'il se prétend un usinage en spirale, en zigzag ou dans un unique sen. Normalement, le sens de coupe le plus favorable est en avalant (l'outil se positionne à la gauche du matériel) et avec un usinage en spirale, car il est plus doux et continue.

En 6, sont mis les paramètres de coupe concernant la rotation et l'avance de coupe que l'outil accomplira pendant l'exécution dans la CNC.

Le point 7 correspond à la tolérance prétendu pour la stratégie définie. Il est mis la surépaisseur à laisser pendant l'usinage, tolérance de la maille d'usinage, incrément radial (pas latéral) et incrément axial (Z) à laisser sur la zone à usiner. Plus grande est la qualité prétendu pour la zone à usiner, plus petite sera la valeur de la de la maille d'usinage.

En 8, il est indiqué comme débutera et terminera le parcours de l'outil. Le programmeur a différentes options pour la définition d'entrée : l'angle d'entrée peut être doux (tangential – préférable) ou perpendiculaire à l'acier (déconseillé aux forces de coupe et de l'impact de l'outil sur l'acier).

En 9 il est vérifié s'il existe la possibilité de l'outil, porte-outils et tête de la machine avoir des collisions avec l'acier c'est-à-dire c'est la boite où l'on peut obtenir automatiquement la hauteur nécessaire de l'outil pour qu'aucun élément rentre en collision avec l'acier. Dans le programme à construire, il peut être sélectionné ce qui

est prétendu et le logiciel garanti qu'aucun de ces éléments ne se heurte avec la pièce, s'éloignant de celle-ci. Avec certaines stratégies et opérations, le remplissage de cette boîtes ne fait aucun sens, parce qu'il s'agit d'outils hauts (ratio hauteur/diamètre supérieur à 5 ; Weinert, Enselmann et Friedhoff (1997)) ou bien parce qu'il s'agit des surfaces ouvertes. Il peut être encore limité l'entrée de l'outil dans certaines zones, pour être trop petites pour l'outil en question. Il existe encore des sous-zones spécifiques pour les reprises d'ébauche en général et de plats.

En 10 il est défini la hauteur de crête laissée entre les passages latéraux de l'outil. En fonction de la phase d'usinage, les crêtes peuvent être tolérés ou pas. En ébauche, on veut un taux élevé d'enlèvement de matière, donc les crêtes peuvent être hautes car elles ne sont pas importantes. Dans la finition, on ne peut pas avoir aucune crête, donnant ainsi une des caractéristiques à la finition du moule (qualité de surface).

En 11, il est défini le rayon de lissage qui se pourra inscrire dans le programme NC pour que l'outil effectue des passages doux près des rayons de la pièce, sans la sacrifier. Lorsque le rayon de l'outil est supérieur au rayon de la pièce, cette option doit toujours être remplie par des rayons supérieurs aux existants de l'outil. De cette façon, l'outil ne vibre pas en arrivant au point maximum du rayon de la pièce, ce qui, en ne laissant pas de marques, augmente la qualité de l'usinage.

Après insérer tous les *inputs* pour la création du programme NC sur la fenêtre de compilation, le programmeur peut donner l'ordre pour que le « calcul » s'effectue, ce processus ira s'effectuer internement. L'output résultant peut et doit être vu par un programmeur de façon à vérifier et valider visuellement le parcours effectué par l'outil. Au cas où le parcours ne correspondrait pas au prétendu, le programmeur devra effectuer les ajustements qu'il considère importants.

Après la validation de tous les pas antérieurs, le programmeur transforme le programme créé en *WorkNc* dans un langage-machine (NC), à travers d'un post processeur (intégré dans tous les logiciels de programmation). Ensuite, il est attribué un nom au programme mentionné, qui sera envoyé pour la machine-outil CNC correspondant, pour qu'il puisse être exécuté.

La Figure 12 présente un tableau de création de programme avec le logiciel *WorkNc*, ce qui permet de visualiser la description présentée.

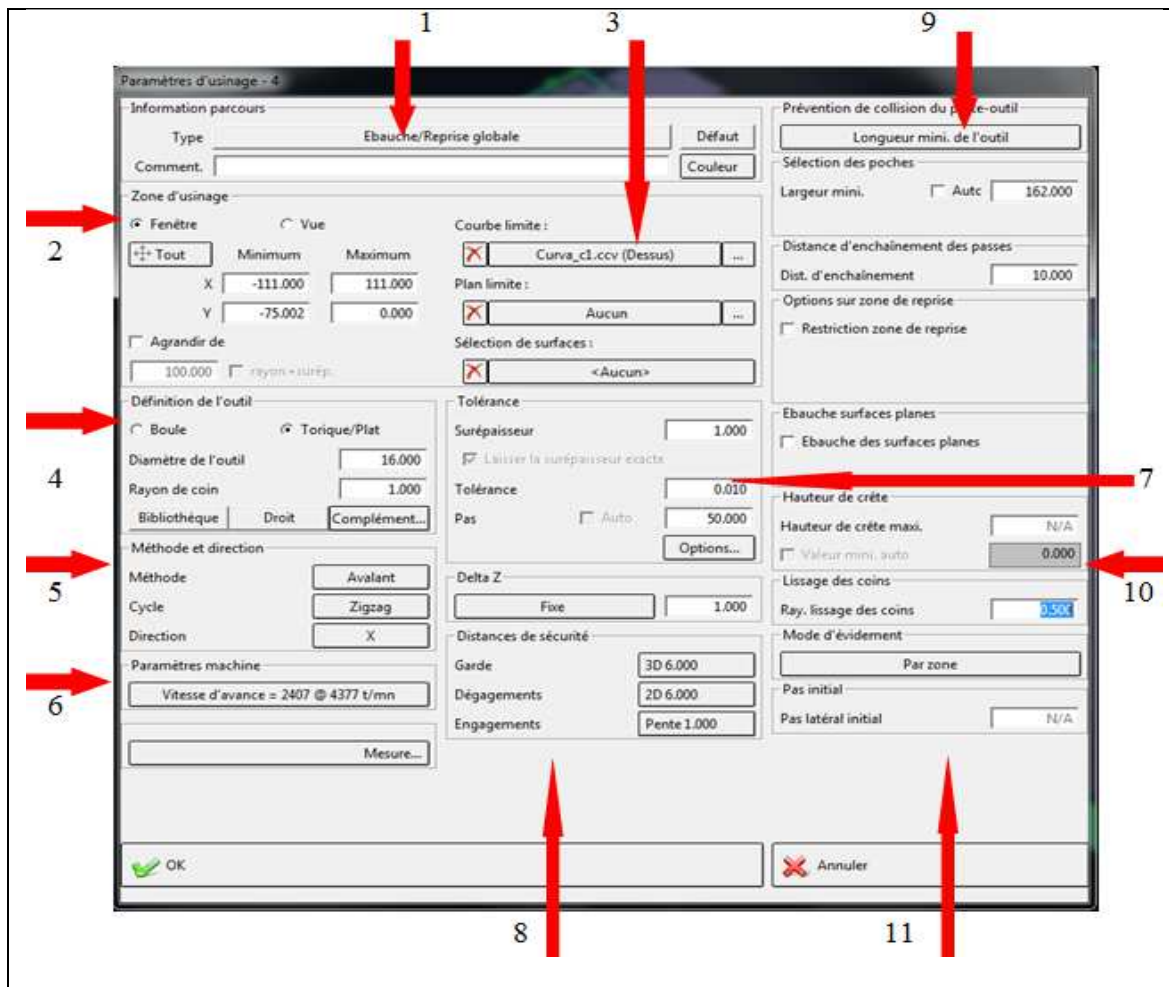


Figure 12 – Fenêtre de compilation du programme WorkNc

Propre source résultante de l'étude

8.12 Validité interne et validité externe

« La validité est un élément de contrôle qui s'applique particulièrement aux études expérimentales » car elle « est celle qui constitue la qualité essentielle de l'étude » (Fortin et Filion, 2006:226). De cette façon, la validité est directement liée à la recherche et à la relation entre variables. Cette validation expérimentale peut être interne et/ou externe selon l'origine et objectif de l'étude. Dans ce cas concret, il se prétend que l'étude ait une validité interne et externe.

La validité interne (Cano, 2004) ou caractère de certitude (Tuckman, 2000) est le degré de certitude de que l'effet sur la VD (temps d'usinage) est dû uniquement et exclusivement à la VI (types d'usinage) de l'expérience. Par d'autres mots, c'est la certitude de que c'est la cause recherchée, et non un autre facteur, qui a produit les

effets observés. Tuckman (2000:173) partage cette idée et ajoute « *que les différences ont lieu comme le résultat d'un traitement expérimental* » et non issues d'une quelconque autre origine, comme est le cas des VE.

Quand la confiance sur l'inférence de causalité est grande, il est considéré que l'étude a une validité interne élevée. Quand il n'est pas certain ce qui a pu causer le changement (ou la stabilité) de la VD, il est considéré qu'elle a une validité interne faible, étant entendu par validité interne l'inférence causale entre cause (VI) et effet (VD) (Cano, 2004). Cano (2004) réfère encore que la validité externe indique dans quelle mesure la relation causale proposée peut être généralisée à d'autres moments, et/ou à d'autres formes de mesurer les variables en question. Cela signifie que si la relation entre les variables en étude est généralisée à d'autres contextes et/ou façons d'opérationnaliser les variables, l'étude a une validité externe élevée. Et quand l'inférence causal, même quand elle est claire et sans équivoque, ne peut pas être élargie à d'autres contextes dû à sa spécificité contextuelle, il est conclu que l'étude a une validité externe basse.

Quelques auteurs considèrent que la validité interne est une condition *sine qua non* de l'étude scientifique mais ça, ne justifie pas donner la priorité absolue à la validité interne en détriment de l'externe, une fois que celle-ci contribue aussi pour l'utilité de la recherche (Kampbel et Standley, 1963¹⁶). Selon Cano (2004), une des formes conventionnelle d'élever la validité interne est d'augmenter le contrôle expérimental : mieux contrôler le contexte expérimental, mesurer ou considérer toutes les variables qui puissent contribuer pour une explication alternative à la ligne causale proposée.

Ainsi, des procédures ont été adoptées avec l'objectif de créer une étude avec une validité interne élevée, c'est-à-dire, garantir que la VD résulte uniquement et exclusivement de la VI, et une validité externe élevée (généraliser cette étude à toute l'IPM pour l'injection de plastique). Ainsi, plusieurs techniques seront utilisées dans cette étude pour garantir sa validité, à savoir :

- contrôle du contexte expérimental : toutes les données seront insérées par l'investigateur de façon à neutraliser n'importe quelle influence externe (facteur humain ou autre) aux résultats ;

¹⁶ in Cano, 2004

- la mesure de la variable dépendante sera faite à travers les processus de simulation ;
- détermination des variables médiatrices (dimension du moule, zone moulante, entre autres), une fois qu'elles peuvent être un facteur d'influence dans la relation entre la VI (types d'usinage) et la VD (temps d'usinage).

PARTIE III

Dans la troisième partie, les résultats concernant les différences de temps entre les simulations conventionnelles et durables (simulation proposée dans cette dissertation) seront analysés et discutés relativement au processus de fraisage et des ressources (humaines, énergétiques et environnementales) et seront présentées les implications pour le savoir académique et pour la gestion. Les limitations de l'étude seront également énoncées ainsi comme quelques suggestions pour des futures études.

9 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Avec cette étude il a été trouvé des valeurs de paramètres de coupe plus optimisés/durables (voir Tableau 8) pour le fraisage des zones de jointe en matrices et noyaux des moules pour l'injection de plastique, de façon à rendre le processus productif et l'entreprise plus durable économiquement, environnementalement et socialement.

L'option d'utiliser la simulation comme technique de collecte de données a permis de créer les parcours des outils en moules produits pendant l'année de 2010 dans l'entreprise où s'est déroulé l'étude, rendant possible non seulement la comparaison entre résultats (mesure des temps de simulation), comme l'élimination de quelques variables médiatrices et de plusieurs variables externes au processus de simulation, telles comme les temps de *setups* (mettre et retirer la pièce de la machine, échange et calibration des outils, appel de programmes et autres temps d'arrêt non programmés) et les temps « morts » inhérents au processus d'usinage et qui ne sont pas comptabilisés pendant la réalisation des simulations.

9.1 Fraisage

Tel comme l'a été dit auparavant, cette étude se centre sur les zones de jointe de la pièce (matrice et noyau), ainsi l'investigateur a effectué des programmes de simulation pour ces zones sans modifier l'usinage des zones moulantes, maintenant la qualité de la finition. Après avoir défini quels étaient les paramètres de coupe conventionnels et les durables (voir Tableau 8) à utiliser dans le processus de fraisage, les programmes ont été construits avec le logiciel *WorkNc* et ont permis d'obtenir les temps de simulation (des fraisages conventionnels et durables) présentés par le Tableau 9, ainsi comme la

différence respective des temps (pour une analyse plus détaillée consulter l'Annexe 1). Malgré que tous les moules de la population soient indiqués (avec les matrices et noyaux respectifs) et organisés par strates selon leur tonnage (voir Tableau 6), seulement ceux qui constituent l'échantillon aléatoire stratifié (constitué par 36 moules c'est-à-dire 36 matrices et noyaux respectifs, faisant un total de 72 pièces) ont l'indication des simulations. Comme été dit auparavant, il était attribué un numéro séquentiel aux moules de l'échantillon, étant le numéro 1C la matrice du moule 1 et le 1B le noyau du même moule.

Le tableau de l'Annexe 1 contemple encore la zone non projetée de la surface de la pièce parcouru par l'outil en simulation. Les valeurs présentés sont exprimées en millimètres carrés (mm^2), car c'est l'unité utilisé dans le secteur des moules au Portugal. Cette information, malgré qu'elle ne soit pas directement liée avec la mesure de la VD est une VM importante, une fois qu'elle pourra se refléter dans quelques mesures.

Avec la préparation de n'importe quelle simulation, le programmeur a dû effectuer une analyse critique, évaluant si les valeurs de l'incrément radial et axial peuvent se majorer (voir Procédures pour la simulation), et combien, face à la pièce à fraiser. Ainsi, il est maintenue la qualité minimum nécessaire de fraisage des zones de jointe, de façon à garantir un correct ajustement du moule et une réduction significative du temps de montage (dans la section de montage).

Les résultats obtenus, résumés par le Tableau 9, montrent que tous les temps de simulation durable ont été inférieurs à ceux de la simulation conventionnelle. Dans les matrices, la simulation conventionnelle a été effectuée en 667h37min pendant que la durable a été effectuée en 497h43min, se traduisant par une différence de 169h54min. En ce qui concerne la simulation des noyaux, la méthode conventionnelle s'est effectuée en 756h57min comparativement aux 553h02min de la méthode durable, se traduisant par une différence de 202h55min.

Les temps de simulation du fraisage durable des matrices et des noyaux représentent une économie de 74,56% et 73,17% respectivement, ce qui va à l'encontre des résultats obtenus par *Tekniker* (l'usinage de haut rendement permet une réduction de temps dans l'ordre des 80% quand comparé avec la conventionnelle), une fois que, en utilisant le fraisage soutenable, il s'obtient une réduction moyenne des temps dans l'ordre des 73,87%, ce qui peut être traduit en 46,6 jours effectifs de travail. Considérant que

l'horaire de travail de chaque collaborateur portugais est de 8 heures par jour et, en moyenne, il existe 22 jours effectifs de travail par mois, le temps mentionné représente environ 2 mois et 5 jours effectifs de travail (voir Tableau 9).

Tableau 9 – Synthèse des temps des simulations effectués

Facteurs	Matrice		Noyau		Totaux
	Conventionnel	Soutenable	Conventionnel	Soutenable	
Subtotaux (hh:mm)	667:37	497:43	756:57	553:02	---
Temps (hh:mm)	169:54		202:55		372:47
%	74,56		73,17		73,87
Jours effectifs	---		---		46,6
Mois effectifs	---		---		2,12

Source propre résultante de l'étude

Il est fondamental souligner que les 2,12 mois pourront contribuer aussi pour la livraison en temps voulu, allant à l'encontre des nécessités des clients et ouvrant des possibilités de gagner de nouveaux clients, augmentant la production annuelle, et améliorant le prestige et la compétitivité de l'entreprise.

Ayant pour base les résultats de l'étude pour l'échantillon de 36 moules (voir Tableau 7) il a été estimé la valeur de l'écart-type de la population à partir de la valeur de l'écart-type de l'échantillon, de façon à calculer une estimation pour le niveau de précision des résultats des différences des temps de simulation. De façon à ce que le degré de fiabilité soit élevé, l'investigateur a travaillé avec un degré de 95% et il a été utilisé une formule de calcul présenté par Daniel et Terrell (1995), tel comme est énoncé par l'Equation 4 (voir Échantillon).

Une fois que l'étude effectuée concerne 36 moules constitués par les respectives matrices et noyaux, il est présenté une estimation pour les temps d'exécution des deux, à partir de l'Equation 4.

Sur la base de l'échantillon, le calcul de l'estimation pour l'écart-type (σ) des matrices a permis d'arriver à une valeur de 5,87857 heures, tandis que pour les noyaux la valeur est de 6,60023 heures. De cette façon, la précision de l'estimation des différences des temps de simulation sera effectuée sur les matrices et noyaux, tel comme est montré en suite :

$$d_{matrices} = 1,96 \cdot \frac{5,87857}{\sqrt{36}} \cdot \sqrt{\frac{56-36}{56-1}} \approx 1,16h, \text{ et}$$

$$d_{noyaux} = 1,96 \cdot \frac{6,60023}{\sqrt{36}} \cdot \sqrt{\frac{56-36}{56-1}} \approx 1,3h$$

Ainsi, il peut être affirmé, avec un degré de fiabilité de 95%, que les résultats présentés auront un niveau de précision de l'estimation des différences des temps de simulation (éloignement ou erreur maximum de l'estimation du temps observé relativement à ce qui s'obtiendrait avec une population de 56 moules) de 1,16h (soit 1h09min) pour les matrices et de 1,3h (soit 1h18min) pour les noyaux.

Selon ce qui a été dit, il peut être conclu que l'incrément des paramètres de coupe (voir Procédures pour la simulation), collectés dans les indications d'utilisation du logiciel, programmeurs et opérateurs CNC (voir Tableau 8), et qui ont été appliqués dans les opérations de simulation de finition par planes parallèles et par niveaux (Z) présents dans cette étude a contribué pour la différence des temps obtenus avec les simulations. Ainsi, à partir des résultats présentés dans le tableau de l'Annexe 1, il ressort que plus grand est l'incrément de l'outil (provenant du Tableau 8), plus courts seront les temps de simulation et, par conséquent les temps de fraisage.

Il est observé encore que, plus les temps de simulation conventionnels sont grands, plus les différences de temps sont grandes relativement à la stratégie durable. Ainsi, il se vérifie une oscillation moyenne de 2 à 4 heures, jusqu'à l'échelon de 2 à 5 Ton, mais au-dessus de cet échelon (5 à 20 Ton) les différences sont plus grandes, allant de 11 à 18 heures.

Les données du tableau de l'Annexe 1 permettent de vérifier que, d'une façon générale, les temps de simulation augmentent avec la dimension (tonnage) du moule car un moule de plus grande dimension aura une zone non projetée (moulante et de jointe) plus grande, augmentant la zone que l'outil devra parcourir de façon à usiner toute la surface.

De cette façon, il est naturel que les temps d'usinage (conventionnel et durable) augmentent au moment que les strates sont constitués par des moules d'une plus grande dimension.

Cependant, il peut être vérifié sur le Tableau 10 que la dimension de la zone de jointe à usiner n'est pas directement liée au tonnage du moule, une fois que, en termes génériques, il existe des moules, de tonnage plus petit mais avec une grande zone non projetée (e.g. moule 1) et des moules de grand tonnage avec une plus petite zone non projetée (e.g. moule 25). Au niveau des strates, on peut constater qu'il existe des moules de tonnage inférieur, dont la zone de jointe à usiner est plus grande que celle des moules avec un plus grand tonnage (e.g. moule 23 vs moule 33); moules de la même strate dimensionnel (tonnage) mais avec des zones différentes (e.g. moules 1 et 2) et, finalement, des moules de différents strates dimensionnels qui ont des zones approximatives (e.g. moules 11 et 25). Il apparaît aussi que, dans le même moule, comme l'exemple du moule 20, la différence des zones non projetés (matrice et noyau) pourra être grande, ce qui n'est pas toujours vérifié (e.g. moule 3).

Tableau 10 – Exemple de différences entre zones non projetées intrastrates et interstrates

Dimension (tonnage - Ton)		Identification		Zones non projetées (mm ²)	
		Matrice	Noyau	Matrice	Noyau
]0 ; 0,25]	0.140	1C	1B	271315	145204
	0.220	2C	2B	33452	84728
]0,25 ; 0,75]	0.300	3C	3B	21084	21316
]0,75 ; 2]	1.070	11C	11B	97584	79053
	1.900	20C	20B	176589	63088
]2 ; 5]	2.920	23C	23B	394535	567709
	3.300	25C	25B	63294	97104
	4.470	27C	27B	176680	209732
]10 ; 20]	14.340	33C	33B	264456	368571

Propre source résultante de l'étude

Dû à ce qui a été dit, il est possible conclure que la géométrie de la pièce (constituée par la matrice et le noyau), considérée une VM, est un élément important pour l'usinage et permet que cette étude s'applique aux moules de différents tonnages. Ainsi, des pièces relativement simples pourront avoir un démoulage compliqué et le contraire pourra aussi arriver, ce qui nous mène à un autre facteur important : la complexité de la zone non projetée.

Il est important mettre en évidence que la complexité géométrique de la zone moulante n'est pas directement liée avec la dimension (tonnage) du moule, car selon le Tableau 5 (Rodrigues, 2002), des moules de grandes et de très grandes dimensions pourront avoir une complexité moyenne (comme est le cas de l'industrie de jardinage), des moules très petits et de petite dimension pourront avoir une complexité élevée (comme est le cas de l'industrie électrique/électronique) et des moules de dimension moyenne pourront avoir une complexité moyenne (comme est le cas de l'industrie d'articles ménagers), c'est-à-dire, un moule d'un tonnage quelconque pourra avoir un niveau de complexité (bas, moyen ou élevé) (Rodrigues, 2002).

Selon ce qui a été dit, les différences de temps entre les simulations conventionnelles et durables sont justifiées non seulement par la taille des moules, mais aussi par la dimension et complexité des zones non projetées, c'est-à-dire, plus est grand et/ou plus complexe sera la zone non projetée de la pièce à simuler/programmer, plus grand sera le temps d'usinage et par conséquent d'usinage, quel que soit le tonnage.

La complexité de la zone non projetée explique que les moules avec des zones plus grandes comparativement à d'autres, pourront avoir des temps de simulation inférieurs (e.g. moules 27B vs 1B), ou que des moules avec des zones non projetées de différentes dimensions pourront avoir des temps de simulation très semblables (e.g. moules 1C vs 8C; moules 4C vs 14C). Ces particularités pourront être dû à l'existence de moules moins complexes en termes techniques, c'est-à-dire, ils ont des zones plus plates qui n'obligent pas l'outil à faire beaucoup de parcours, changements de direction, avances/vitesse, entre autres.

9.2 Economie dans l'utilisation des ressources

La réduction dans les temps de simulation, et par conséquent dans les temps de production, a permis vérifier quelle est la répercussion de l'utilisation du fraisage durable sur la nécessité de main d'œuvre, la consommation énergétique (traduite en euros) et l'émission de dioxyde de carbone (CO₂) pour l'atmosphère (traduite en kilogrammes).

9.2.1 Ressources humaines : coût de l'heure homme-machine

Dans l'entreprise où se déroule l'étude, la moyenne du prix de l'heure homme/machine pour le parc des machines où seront effectués l'usinage des matrices et noyaux est de 30€/h. Avec la diminution des heures de simulations, le temps d'exécution diminue aussi, ce qui implique moins d'heures pour l'opérateur avec une pièce déterminée. Avec la diminution des temps de fraisage des pièces, l'entreprise arrive à apporter une valeur ajoutée à travers la réduction des coûts de production, maintenant la qualité finale. Ainsi, il a été construit l'Equation 5, en faisant appel au prix de l'heure de l'homme /machine en vigueur dans l'entreprise et à la différence des temps de simulations, tel comme peut-on voir sur le tableau de l'Annexe 2, pour calculer « l'économie en homme/machine ».

Equation 5 – Economie en homme/machine résultante de la différence de simulation

$$\begin{aligned} \text{Economie en homme/machine(€)} &= \\ &= \text{Différence de temps de simulation (h)} * \text{prix moyen de l'heure homme/machine (€/h)} \end{aligned}$$

Les résultats calculés à travers l'Equation 5 (résumés sur le Tableau 11) montrent que les réductions de temps enregistrées auparavant faisant appel à la simulation durable, permettent d'économiser un total de 11.184€ en main d'œuvre utilisée (heures en homme/machine) (pour une analyse plus complète consulter l'Annexe 1).

Tableau 11 – Synthèse de l'économie en ressources humaines due à la simulation durable

Pièce		Qté pièces	Différences de temps de simulation (hh:mm)	Temps de simulation (hh)	Economie en homme/machine (€)
n°	type				
TOTAL	C	36	169:54	169,89	11.184
	B	36	202:55	202,91	
		72	372:49	372,8	

Propre source résultante de l'étude

9.2.2 Ressources énergétiques

Pour trouver les valeurs concernant la consommation de « l'économie énergétique (€) » (voir synthèse sur Tableau 13), il a été trouvé la valeur de la « consommation moyenne des CNC (kW) » (voir Tableau 12), faisant appel aux consommations théoriques (du catalogue) en kilowatt (kW) des équipements concernés car il est impossible prévoir sur quel équipement il se pourrait concrétiser la simulation faite en *WorkNc*, n'oubliant pas que les machines n'ont pas toutes la même consommation énergétique. De cette façon, les effets des oscillations dans les consommations des équipements peuvent être minimisés (variables médiatrices), contribuant pour une plus grande validité (interne et externe). Le Tableau 12 montre le parc de machines et sa puissance respective de catalogue, que l'investigateur considère comme étant une variable médiatrice (VM).

Tableau 12 – Consommation moyenne des CNC (kW)

Equipement	Puissance Mac. (kW)
Moriseiki - SV 500	50
Anayak - VH 3000 Plus	43
Huron - KX 30	54
Anayak - P 3200	40
Anayak - H 3000 MG	50
Mori Seiki - NV 6000	36
HURON - Kx10Five	63
HURON - Nx40	54
HURON - Kx20	54
Moyenne	49,33(3)

Propre source

À partir de la différence horaire et de la consommation moyenne des CNC, une consommation moyenne a été obtenue correspondante à chaque simulation. Pour cela il a été effectué le calcul suivant :

Equation 6 – Consommation énergétique moyenne de la simulation (kWh)

$$\begin{aligned} \text{Consommation énergétique moyenne dans la simulation (kWh)} &= \\ &= \text{Consommation moyenne CNC (kW)} \\ &* \text{Différence de temps de simulation (h)} \end{aligned}$$

Le calcul de l'économie énergétique (€) provenant de la différence de temps entre le fraisage conventionnel et le fraisage durable (Equation 7) dans les différentes simulations résulte des valeurs provenant de l'Equation 6 (présentés par strates sur le tableau de l'Annexe 3) et de la valeur unitaire par kWh:

Equation 7 – Economie énergétique (€) provenant de la différence de temps de simulation

$$\begin{aligned} \text{Economie énergétique (€)} &= \\ &= \text{Consommation énergétique moyenne dans la simulation (kWh)} \\ &* \text{Valeur unitaire par kWh(€)} \end{aligned}$$

Ainsi, en 2010, année où se déroule cette étude, la valeur unitaire par kWh appliquée à l'entreprise par l'EDP (Energies de Portugal) était de 0,11€ (onze centimes d'euros) et à partir de la conversion des temps concernant le fraisage durable, contenu dans le Tableau 9, par kilowatt (kW), heures (h) et euros (€), il a pu être constaté que, à travers de l'utilisation du fraisage durable, l'entreprise peut économiser 2.022,92€ en énergie électrique, maintenant le niveau de production (voir Tableau 13) (pour une analyse plus précise consulter l'Annexe 3).

Tableau 13 – Synthèse de l'économie énergétique faisant appel à la simulation durable

Pièce		Qté pièces	Temps de simulation (hh)	Consommation moyenne dans la simulation (kWh)	Economie énergétique (€)
n°	type				
TOTAL	C	36	169,89	18.390,22	2.022,92
	B	36	202,91		
		72	372,8		

Propre source résultante de l'étude

9.2.3 Ressources environnementales : émissions de dioxyde de carbone (CO₂)

Avec la valeur de la consommation énergétique moyenne obtenue à travers la simulation (kWh) (Equation 6), il peut être calculé la quantité moyenne de dioxyde de carbone (CO₂) dont l'émission pour l'atmosphère pourra être évitée, à travers l'économie d'énergie électrique. Pour cela, il sera utilisé la valeur officielle fournie par le site de l'EDP sur internet, (<http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>), consulté le 24 janvier de 2011), où se trouve que la valeur moyenne de l'émission de dioxyde de carbone (CO₂) en 2010 a été de 226,74 g/kWh. Cette valeur englobe toutes les ressources de production d'énergie, à savoir les ressources hydriques, éolienne, nucléaire, cogénération et production à très petite échelle, ainsi comme celles provenant de la combustion de charbon, fuel, gaz naturel et autres formes de plus petite expression énergétique non mentionné sur le site.

Le Tableau 14 (tableau résumé du tableau de l'Annexe 3) indique la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) non émis pour l'atmosphère, en vertu de la différence de temps d'usinage par pièce. Les valeurs présentés sont exprimés en unité de SI (Système International), gramme(g), mais pour une meilleur compréhension elles furent transformées en kilogramme, Kg. Sur le Tableau 14 il peut être observé que, faisant appel à la simulation durable, l'entreprise cesse d'émettre plus de 4 Tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) pour l'atmosphère, ce qui correspond à 226,74 g/kWh, une fois qu'elle a consommé moins d'énergie (voir Tableau 13). Selon l'INE (2010) des progrès

ont été constatés au niveau de la performance environnementale de l'industrie portugaise, notamment au niveau des émissions de gaz à effet de serre. En ce qui concerne l'IPM, il est important souligner que le fraisage durable pourra augmenter la réduction de l'émission de gaz à effet de serre, notamment le CO₂, une fois que :

« en 2008, il est estimé qu'il s'est enregistré une diminution de l'intensité des émissions de gaz à effet de serre en 2,1%, relativement à 2007. En effet, pendant que en 2007 il a été émis 579,4 g de CO₂ par euro de VAB géré, en 2008 la valeur a été de 567,1 g de CO₂, renforçant la tendance, vérifiée à partir de 2006, d'une plus petite variation relative de ces émissions, comparativement à la croissance de l'activité économique » (INE, 2010:1).

En ce sens, l'entreprise contribue pour la résolution d'un problème global (allant à l'encontre de ce qui a été mentionné auparavant par l'ONU, 2011a), alors qu'elle améliore son image auprès du consommateur/client, en adoptant une position responsable relativement à son impact environnemental (Ferreira, 2010).

Tableau 14 – Synthèse de la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) non émis pour l'atmosphère en faisant appel à la simulation durable

Pièce		Qté pièces	Temps de simulation (hh)	Consommation moyenne dans la simulation (kWh)	CO ₂ (Kg) non émis
n°	type				
TOTAL	C	36	169,89	18.390,22	4.169,79
	B	36	202,91		
		72	372,8		

Propre source résultante de l'étude

Le Tableau 15 présente la synthèse de tous les résultats obtenus avec cette recherche faisant appel à la simulation durable en détriment de la simulation conventionnelle.

Cette recherche permet de constater que l'utilisation du fraisage durable au lieu de la conventionnelle permet de réduire le temps de simulation en 372:49 heures, ce qui

correspond à 46,6 jours (environ 2 mois et 5 jours) de travail effectif et à 11.184€ en heures d'homme/machine. Il est encore notable qu'en adoptant ce type de fraisage, l'entreprise laisserait de consommer 18.390,22 kWh d'énergie ce qui signifie une économie de 2.022,92€. Ainsi, il est possible affirmer que l'adoption de la simulation/fraisage durable représenterait une économie de 13.206,92€ par année pour l'échantillon analysé.

Au-delà des gains monétaires directes pour l'entreprise, la diminution des temps de fraisage peut représenter un gain indirect pour l'organisation, traduite par la fidélisation de clients, lors de la livraison des moules dans les délais accordés ou plus courts (compétitivité), par la production d'une plus grande quantité de moules avec les mêmes ressources, entre autres aspects. D'un autre côté, l'émission de plus de 4 Tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) pour l'atmosphère est évitée, contribuant ainsi pour la diminution de l'impact environnemental de l'entreprise, améliorant son image auprès des *stakeholders*.

Ainsi, l'optimisation du processus de fraisage et la conséquente diminution des temps utilisés est importante grâce à l'économie dans l'utilisation des ressources humaines et énergétiques et par sa contribution pour le potentiel compétitif de l'entreprise et pour sa durabilité environnementale.

Tableau 15 – Synthèse des résultats de la recherche

Dimension (Tonnage)	Taille de l'échantillon	Différence de temps de simulation		Consommation dans la simulation (kWh)	Economie en homme/machine (€)	Economie énergétique (€)	CO ₂ non émis pour l'atmosphère		Economie total (€)
		(h)	(jours)				(g)	(Kg)	
]0 ; 0,25]	2	9:09	1,14	451,37	274,50	49,65	102343,52	102,34	324,15
]0,25 ; 0,75]	4	8:41	1,08	427,69	260,10	47,05	96974,68	96,97	307,15
]0,75 ; 2]	15	51:36	6,45	2544,93	1547,70	279,94	577038,48	577,04	1827,64
]2 ; 5]	6	54:51	6,86	2705,75	1645,50	297,63	613501,87	613,50	1943,13
]5 ; 10]	5	123:03	15,38	6070,06	3691,50	667,71	1376324,61	1376,32	4359,21
]10 ; 20]	2	45:55	5,74	2265,23	1377,60	249,18	513619,08	513,62	1626,78
]20 ; ∞[	2	79:34	9,95	3925,19	2387,10	431,77	889997,15	890,00	2818,87
TOTAL	36	372:49	46,60	18.390,22	11.184,00	2.022,92	4.169.799,39	4.169,79	13.206,92

Propre source résultante de l'étude

10 CONCLUSIONS

Cette étude a suivi comme point fondamental l'optimisation du processus de fraisage et sa contribution pour le développement durable. Le choix effectué est dû à, d'un côté, le fraisage être considéré comme le 'cœur' du processus productif de l'entreprise des moules, car presque toutes les pièces passent par cette section et, d'un autre côté, d'être fondamental améliorer la compétitivité des entreprises, contribuant pour la durabilité environnemental et économique.

Pour tester les hypothèses directrices de la recherche et avec l'impossibilité de matérialiser les moules, il a été fait des simulations par ordinateur à travers l'utilisation d'un logiciel de génération des parcours d'usinage (*WorkNc*), généralement utilisé par l'IPM dans la fabrication des moules pour injection de plastique. Ces simulations sont axées sur les zones de jointe des matrices et des noyaux du moule avec l'intention de réduire les temps productifs. De cette façon, les zones moulantes (l'âme du moule) ne sont pas affectées dans cette étude, ce qui implique maintenir la qualité de la finition de surface, telle comme l'est fait actuellement.

La population de l'étude concerne des moules de différentes dimensions, organisés par strates, selon l'échelle de Rodrigues (2002:169), de façon à permettre à l'étude une plus grande portée, une fois que l'IPM pour l'injection de plastique est constitué par des entreprises spécialisées en tout genre de dimensionnement de moules (tonnage). Des 56 moules de la population, il a été constitué un échantillon aléatoire stratifié de 36 moules, pour un total de 72 pièces (36 matrices et noyaux respectifs), car ce type d'échantillonnage permet que les éléments de toutes les classes aient une probabilité égale de faire part de l'échantillon, en renforçant sa représentativité (Fortin et Filion, 2006).

Dans cette perspective expérimentale de l'étude des variables ont été défini, notamment la variable indépendante (VI) (simulation conventionnelle et durable) la variable dépendante (VD) (temps de simulation). Cependant, pendant les recherches expérimentales l'investigateur doit contrôler un autre type de variables pour que celles-ci n'influencent pas le résultat final, ainsi les variables médiatrices (VM) (dimension du moule) ont été dûment contrôlées et l'effet des variables externes (VE) a été neutralisé. De cette façon, il est garanti que les résultats obtenus (VD, soit, temps de simulation) sont seulement influencés par la VI (type de fraisage). De cette façon, seulement ont été

modifiés les incréments axiaux (opération en niveau Z) et radiaux (opération de plans parallèles), selon le type d'opération à effectuer, sans modifier d'autres paramètres techniques dans la programmation, de façon à neutraliser n'importe quelle influence sur les résultats sauf la VI. En procédant ainsi, l'investigateur a garanti la validité interne de l'étude et a permis la comparaison des résultats entre le groupe de contrôle (pièces soumises à la simulation conventionnelle et le groupe expérimental (pièces soumises à la simulation durable).

À partir des résultats obtenus il est possible vérifier que le fraisage durable contribue, de façon significative, pour la réduction des temps de simulation et, par conséquent, de production (H1), ce qui permet une réduction de temps homme/machine (H2) et de consommation d'énergie (H3) que, à son tour, permet une décroissance dans les émissions de CO₂ pour l'atmosphère (H4). Les résultats obtenus montrent qu'il est possible maintenir la qualité des moules produits et réduire les délais de livraison aux clients (El-Haggar, 2007), tandis que l'utilisation et la consommation de ressources est modérée (ONU, 2011a) contribuant ainsi pour la durabilité économique et environnemental de l'entreprise.

La réduction des temps de fraisage est vérifiée dans tous les strates, car la stratégie durable peut être appliquée à des moules de différents tonnages (H5). Dans ce processus il est constaté que la zone non projetée de la zone de jointe influence les temps du processus productif (H6) et que, à cela, il peut être ajouté la complexité de la ligne de jointe (qui définit la zone non projetée de la matrice et du noyau), car contribue aussi pour la différence des temps observés. Par conséquent, la différence des temps est influencée par la zone non projetée, par la complexité de la ligne de jointe et par le tonnage du moule, c'est pourquoi la stratégie durable peut permettre la diminution des temps de fraisage avec des moules de différents tonnage.

En vertu de ce qui a été dit, il est important souligner que la stratégie de fraisage durable permet non seulement l'économie, à travers l'utilisation optimisée des ressources humaines et énergétiques, comme favorisée le développement de l'entreprise, une fois qu'il s'est enregistré une décroissance dans les temps de réalisation du fraisage durable relativement au conventionnel et, par conséquent, dans la nécessité de main d'œuvre utilisée, bien comme dans les consommations d'énergie et dans les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), tel comme est résumé sur le Tableau 15. Selon Young

(2007) e El-Haggar (2007), les entreprises ont des profits avec le développement durable, au niveau économique (réduction des temps de production, qui se traduit dans les heures homme/machine et dans la consommation énergétique) et au niveau environnemental (la réduction de la consommation électrique implique une réduction de production et conséquente émission de CO₂ pour l'atmosphère).

À la fin du processus de recherche, il est possible affirmer que, malgré les différents tonnages des moules, l'augmentation des incréments radiaux et axiaux dans le programme de simulation (fraisage durable) permet de meilleurs temps dans le processus productif des moules pour injection de plastique. Effectivement, l'orientation pour des pratiques durables permet à l'entreprise de créer un avantage concurrentiel en produisant en moins temps et avec moins ressources, une fois qu'elle lui permet d'autres variables dans la négociation avec les clients et ouvre la possibilité de chercher de nouveaux créneaux de marché. En somme, l'adoption de nouvelles formes productives écologiquement plus correctes peut augmenter la productivité et la compétitivité, grâce à l'amélioration de l'image de l'entreprise sur le marché, à la réduction des coûts et à la diminution de l'impact environnemental (Melo, 2006; Young, 2007).

Comme a été considéré par Ferreira (2010), l'adoption de solutions qui contribuent pour le développement durable implique une perspective à long terme, optimisation et efficacité, interdépendance et coopération permettant, tel comme est défendu par Young (2007) et Ferreira (2010), améliorer la compétitivité de l'entreprise à moyen/long terme. Epstein (2008) et l'ONU (2011b) renforcent l'idée et ajoutent que les entreprises qui arriveront à développer des stratégies pour affronter une pénurie de ressources énergétiques, la nécessité des ressources humaines et de consommables gagneront compétitivité. Dans ce contexte, les entreprises acquièrent un rôle prépondérant pour la durabilité économique et environnemental, ainsi comme pour la préservation de la nature, jouant un rôle actif dans le développement durable.

10.1 Implications pour le savoir académique

Cette recherche contribue pour le savoir académique une fois qu'il ne s'est vérifié aucune étude semblable dans le secteur des moules, pendant la revue de la littérature, ce qui permet à cette étude d'être une plus-value pour le savoir académique. Ainsi, la simulation, d'une façon durable, de rendre opérationnel le fraisage a fourni des données importantes pour la compétitivité de l'Industrie Portugaise des Moules et pour ses futures études. L'importance de l'adaptation des processus productifs pendant ses divers moments est un facteur stratégique dans des secteurs industriels principalement exportateurs.

Bien que Jorge (2011) ait une étude semblable du processus productif, concernant l'utilisation des ressources, cette étude va plus loin une fois que à partir de la mesure des temps de simulation de fraisage il a été calculé les nécessités de ressources humaines, de consommation d'énergie et conséquentes émissions de CO₂, lors d'un abordage nouveau au processus de production de moules au Portugal.

Ainsi il est important souligner que la transformation de la façon comme s'organisent les processus productifs, sans faire appel à d'autres investissements, peut être un thème de recherche intéressant pour augmenter la compétitivité des entreprises.

10.2 Implications pour la gestion

L'optimisation du processus productif est de très grande importance pour l'Industrie Portugaise des Moules pour injection de plastique, une fois qu'elle intervient directement sur les temps productifs, la productivité de l'entreprise et les ressources utilisées (humaines, énergétiques, entre autres). Si ce processus d'amélioration n'implique pas de nouveaux investissements, mais seulement l'utilisation de ressources disponibles et, malgré cela, favorise la compétitivité on peut considérer que les gains sont effectivement significatifs.

En minimisant les temps productifs on arrive à produire plus en moins de temps, diminuer les coûts de production et, ainsi, augmenter la compétitivité de l'entreprise au niveau national et international (El-Haggar, 2007), car le moule final est délivré plus rapidement, ce qui apporte une valeur ajoutée au service fourni par l'entreprise. D'une autre côté, les mesures suggérés pour le processus d'optimisation implique que

l'entreprise soit plus rentable économiquement et durable au niveau environnemental, ce qui pourra ouvrir les portes à de nouveaux marchés et niches de marché, une fois que la contribution pour la durabilité environnemental peut être une caractéristique spécifique et une plus-value pour l'image de l'entreprise relativement à ses *stakeholders*. Par conséquent, optimiser le processus productif est non seulement une nécessité économique pour l'IPM comme est fondamental pour sa compétitivité, elle devrait être considérée par les acteurs de gestion comme une stratégie d'affaire et non pas comme une question secondaire.

Selon ce qui a été dit, il est attendu que les résultats de l'étude viennent à être une contribution pour l'optimisation du processus productif de l'IPM, une fois qu'ils permettront améliorer sa compétitivité et contribuer pour le développement de ce secteur industriel, tellement important pour le pays.

10.3 Limitations de l'étude

Cette étude présente quelques limitations qui laissent ouverts quelques points de départ pour des futures recherches. Même si la simulation par ordinateur est un énorme avantage, minimisant le temps de recherche, cela n'implique pas la matérialisation des simulations, ce qui peut être aussi vu comme un inconvénient pour l'étude, une fois que les simulations sont à l'abri de l'imprévu et se réalisent dans des contextes idéaux.

L'inexistence d'études semblables dans le secteur des moules, vérifiée pendant l'étude de la littérature pour cette dissertation, peut être considérée comme une limitation pour l'étude, une fois qu'il n'existe pas d'autres résultats qui puissent être comparés aux obtenus, de façon à donner une plus grande validité à cette recherche. D'une autre côté, la construction et opérationnalisation méthodologique ont été plus difficiles par l'impossibilité d'une réplique.

10.4 Suggestions pour des futures études.

Il est suggéré que, dans futures recherches, cette étude soit répliquée, mais à partir de la construction d'une pièce simple, avec relief, qui permette de tester les opérations amplement utilisées (simulation par plans parallèles et par niveau).

Il serait encore scientifiquement important que des études semblables se réalisent dans d'autres entreprises, de façon à pouvoir élargir les résultats à des moules de plus grande dimension, à uniformiser les paramètres de coupe et qui utiliseraient d'autre(s) logiciel(s).

Cette étude peut encore servir de base pour d'autres qui examineraient des moules en tenant en compte les tonnages et l'industrie-cliente pour laquelle ils seraient destinés. De cette façon, il serait possible analyser l'importance et la rentabilité de chacun et comprendre son importance stratégique pour l'IPM.

Pour tout ce qui a été dit, il est évident qu'il existe encore un long chemin à parcourir pour une connaissance plus profonde et systématique du thème, mais il est attendu que cette étude ait contribué non seulement pour l'optimisation et le développement durable de l'IPM, bien comme pour l'ouverture de nouveaux chemins de recherche.

11 Références Bibliographiques

Adamczyk, Z. (2004) *Integration concept of CAM system and tool diagnostic system in optimization of machining processes*, Journal of Materials Processing Technology, 157-158, pp 8-15.

Agapiou, J.S. (1992) *Cutting Tool Strategies for Multifunctional Part Configurations: Part I: Analytical Economic Models for Cutting Tools*, Wayne State University, Detroit, USA.

Agence pour l'investissement et commerce externe de Portugal (AICEP) (2012) *Portugal: Comércio Internacional de Moldes (NC 8480)*, Lisbonne, Portugal.

Association National de l'Industrie des Moules (Cefamol) (1996) *Posicionamento Internacional do Setor dos Moldes*, Marinha Grande, Portugal.

Association National de l'Industrie des Moules (Cefamol) (2011) *A Indústria Portuguesa de Moldes*, Marinha Grande, Portugal.

Beira, E. (2007) *Indústria de moldes no Norte de Portugal: Protagonistas – uma colecção de testemunhos*, Edição Centimfe, ISBN 978-972-98872-7-7

Cano, I. (2004) *Introdução à avaliação de programas sociais*, FGV Editora, 2ª edição, ISBN 85-225-0379-6.

Carvalho, J. (2007) *Metodologia de Optimização de Processos de Conformação Plástica*, Universidade de Aveiro, Portugal, Dissertation de Maitrise.

Daniel, W. et Terrell, J. (1995) *Business Statistics for Management and Economics*, 7ª edição, Houghton Mifflin Company, Boston.

El-Haggar, S. (2007) *Sustainable Industrial Design and Waste Management: Cradle-to-cradel for Sustainable Development*, Academic Press Title, USA, ISBN 978-0-12-373623-9.

Epstein, M. (2008) *Making sustainability work: Best practices in Managing and measuring corporate social, environmental and economic impacts*, Berrett-Koehler Publishers Inc., EUA, ISBN 978-1-906093-05-1.

Faustino, J. (2012) *in* suplemento integral de l'édition n° 3906 do Journal Região de Leiria et l'édition n° 854 du diário de Lisboa, Porto e Oliveira de Azeméis de 27 de Janvier 2012, p 10.

Ferreira, I. (2001) *Caracterização da indústria de moldes da região da Marinha Grande, na ótica da Qualidade*, Escola de Gestão do Porto, Universidade do Porto, Dissertation de Maitrise.

Ferreira, M. (2010) *Gestão do Design e sua adequação a um novo paradigma regido pela sustentabilidade*, Faculdade de Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa, Dissertation de Maitrise.

Figueiredo, D. (2010) *Otimização da produção de coletores solares: caso de estudo na WS Energia*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisbonne, Dissertation de Maitrise.

Fortin, M. et Filion, J. (2006) *Fundamentos e etapas do processo de investigação*, Editora Lusodidacta, ISBN 978-989-8075-18-5, Lisbonne.

Gomes, S. (2009) *As práticas de Sustentabilidade Estratégica nas Empresas Portuguesas – Estudo de Caso: Corticeira Amorim*, Universidade do Porto, Portugal, Dissertation de Maitrise.

Hatna, A., Grieve, R. et Broomhead, P. (1998) *Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues*, Computer Integrated Manufacturing Systems, Vol. 11, n° 4, pp 309-330.

Hoffman, A. et Bazerman, M. (2008) *Changing practice on sustainability: understanding and overcoming the organizational and psychological barriers to action*, Berrett-Koehler Publishers Inc., EUA, ISBN 978-1-906093-05-1.

Institute National de Statistique (INE) (2007) *Índice Alfabético da Classificação Portuguesa das Actividades Económicas, Revisão 3 (CAE-Rev.3)*, Lisbonne, Portugal, ISBN 978-972-373-918-0.

Institute National de Statistique (INE) (2010) *Indicadores Económico-ambientais 1995-2008*, edição setembro 2010, Lisbonne, Portugal.

Institute National de Statistique (INE) (2012) *Estatística do Ambiente 2010*, édition 2011, publiée en 26 de Janvier 2012, Lisbonne, Portugal, ISBN 978-989-25-0127-7.

Jorge, M. (2011) *Reduction in water consumption during the process of wine production*, Esporão S.A., <http://www.bcsdportugal.org/2010/2002.htm> consulté en 2 de Juin 2012.

Lin, T. (2002) *Optimisation Technique for Face Milling Stainless Steel with multiple performance characteristics*, Advances in Manufacturing Systems Engineering, ASME 19, pp 330–335.

Malakooti, B. et Deviprasad, J. (1989) *An interactive multiple criteria approach for parameter selection in metal cutting*, Operations Research, Vol 37, n° 5, pp 805-818.

Melo, L. (2006) *Apoio Institucional como Determinante para Ecoeficiência nas Micro e Pequenas Empresas Industriais: um estudo de caso para o Município de Maceió*, Universidade Federal de Alagoas, Dissertation de Maitrise.

Menezes, U., Kneipp, J., Rosa, L. et Gomes, C. (2010) *Estratégia de Inovação Sustentável: um estudo multicase no setor químico*, XIII SEMEAD, ISSN 2177-3866.

Mukherje, I. et Ray, P. (2005) *A review of optimization techniques in metal cutting processes*, Computers & Industrial Engineering, Vol 50, pp 15–34.

Oliveira, A. (2008) *Ecoeficiência na indústria de laticínios na Ilha de São Miguel*, Universidade dos Açores, Açores, Dissertation de Maitrise.

Organisation des Nation Unies (ONU) (1991) *O Nosso Futuro Comum* in Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Fundação Getúlio Vargas, 2ª edição, Brasil, ISBN 001-435-010-8.

Organisation des Nation Unies (ONU) (2011a) *Manufacturing: investing in energy and resource efficiency*, Green economy, ONU.

Organisation des Nation Unies (ONU) (2011b) *UNEP's ground-breaking report: Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*, ONU <http://www.unep.org/GreenEconomy/> consultée en Octobre 2011.

Park, K. et Kim, S. (1998) *Artificial intelligence approaches to determination of CNC machining parameters in manufacturing - a review*, Artificial Intelligence in Engineering, 12, pp 121–134.

Pereira, J. (2009) *Sustentabilidade: Diferentes Perspetivas, um Objetivo Comum* in *Global Economics and Management Review*, n°1, pp 115–126, ISSN 0873-7444.

Ravindran, A., Ragsdell, K. et Reklaitis, G. (2006) *Engineering optimization: methods and applications*, 2ª edição, John Wiley & Sons, Inc., EUA, ISBN 0-471-55814-1.

Magazine (2011) *INVEST*, n° 80, Invest.

Magazine (1993) *O molde*, n° 20, Cefamol.

Magazine (1993) *O molde*, n° 21, Cefamol.

Magazine (2011) *O molde*, n° 89, Cefamol.

Robinson, S. (2004) *Simulation: the practice of model development and use*, John Wiley and Sons, Ltd., ISBN 0-470-84772-7.

Rodrigues, S. (2002) *Business strategy and organizational performance: An analysis of the Portuguese mould industry*, Universidade de Wolverhampton, Rois Unie, Thèse de Doctorat.

Sampieri, R., Collado, C. et Lucio, P. (2006) *Metodologia de pesquisa*, 3ª edição, McGraw-Hill, ISBN 85-8680493-2.

Savitz, A. (2007) *A empresa sustentável: o verdadeiro sucesso é o lucro com responsabilidade social e ambiental*, Elsevier, Rio de Janeiro.

Silva, A. (1981) *Simulação em Engenharia Química*, Separata da Revista da Universidade de Coimbra, Vol XXIX, pp 321–328.

Sönmez, A., Baykaso, A., Dereli, T. et Hüseyin I. (1999) *Dynamic optimization of multipass milling operations via geometric programming*, International Journal of Machine Tools and Manufature, Vol 39, n° 2, pp 297–320.

Sun, W. et Yuan, Y. (2006) *Optimization theory and methods: nonlinear programming*, Springer, ISBN 0-387-24975-3.

Tocha, R. (2012) in suplemento integral de l'éditio n° 3906 du Journal Região de Leiria, n° 854 du Diário de Lisboa, Porto e Oliveira de Azeméis de 27 de Janvier 2012, p 22.

- Tolouei-Rad, M. et Bidhendi, M. (1996) *On the optimization of machining parameters for milling operations*, International Journal of Machine Tools & Manufature, Vol 37, nº 1, pp 1–16.
- Tuckman, B. (2000) *Manual de investigação em educação*, Fundação Calouste Gulbenkian, 4.^a ed., ISBN 972-31-0879-8.
- Vasconcelos, S. et Filho M. (2009) *Vantagem competitiva com a prática de responsabilidade social e sustentabilidade?*, Ciências Sociais Aplicadas em Revistas, nº 2, pp 97–112.
- Vieira, F. (2007) *Distritos industriais e inovação: o setor dos moldes em Portugal*, Universidade do Minho, Portugal, Thèse de Doctorat.
- Wang, J. (1998) *Computer-aided economic optimization of end-milling operations*, International Journal of Production Economics, 54, pp 307–320.
- Weinert, K., Enselmann, A. et Friedhoff, J. (1997) *Milling Simulation for Process Optimization in the Field of Die and Mould Manufacturing*, University of Dortmund, Dortmund, Allemagne.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2010) *Vision 2050: The new agenda for business*, Geneva, Suisse.
- Young, C. (2007) *Sustentabilidade e Competitividade: O Papel das Empresas*, Magazine d'Economie Mackenzie, Vol 5, nº 5.

12 Webographie

http://www.brasilomatics.com.br/a2c_cms//fckeditor/uploads/File/8.-%20Mejoras%20de%20procesos_2_PTB.pdf

consultée en 20 d'Octobre 2012.

Banco de Portugal (2012)

http://www.bportugal.pt/pt-PT/EstudosEconomicos/Publicacoes/RelatorioAnual/Publicacoes/RA_11_p.pdf

consultée en 9 de Septembre 2012.

<http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>

consultée en 24 de Janvier 2011.

Faustino, J. (2012) *in* Journal Região de Leiria, édition online de 30 d'Avril 2012

<http://www.regiaodeleiria.pt/blog/2012/04/30/moldes-precisam-de-mao-de-obra/>

consultée en 30 de Juillet 2012.

ANNEXES

Annexe 1 – Temps des simulations effectuées

				Temps de simulation (hh :mm)						Zones non projetées		
Dimension (Tonnage)		Taille échantillon	Identification		Matrice		Noyau		Différences		(mm ²) Matrice Noyau	
			Matrice	Noyau	Conventionnel	Durable	Conventionnel	Durable	Matrice	Noyau		
]0 ; 0,25]	0.140	2	1C	1B	4:43:00	2:58:00	17:21:00	11:12:00	1:45:00	6:09:00	271315	145204
	0.200											
	0.220		2C	2B	2:07:00	1:35:00	1:52:00	1:09:00	0:32:00	0:43:00	33452	84728
]0,25 ; 0,75]	0.300	4	3C	3B	0:43:00	0:25:00	0:50:00	0:29:00	0:18:00	0:21:00	21084	21316
	0.415		4C	4B	5:56:00	4:00:00	5:25:00	3:37:00	1:56:00	1:48:00	33049	86582
	0.430		5C	5B	5:56:00	4:00:00	5:25:00	3:37:00	1:56:00	1:48:00	33049	86582
	0.560		moules de tour									
	0.600		moules de tour									
	0.600		moules de tour									
	0.690		6C	6B	0:46:00	0:32:00	1:29:00	1:09:00	0:14:00	0:20:00	14868	25354
]0,75 ; 2]	0.840	15	7C	7B	2:19:00	1:37:00	5:22:00	3:33:00	0:42:00	1:49:00	56828	63088
	0.910		8C	8B	4:18:00	3:29:00	2:37:00	1:55:00	0:49:00	0:42:00	77747	112530
	0.910											
	0.960		9C	9B	2:49:00	2:13:00	1:40:00	1:11:00	0:36:00	0:29:00	30201	29930
	0.960		10C	10B	2:37:00	2:05:00	1:31:00	1:11:00	0:32:00	0:20:00	30201	29930
	1.070		11C	11B	2:00:00	1:14:00	3:37:00	2:14:00	0:46:00	1:23:00	97584	79053
	1.120											
	1.190											
	1.190											
	1.190		12C	12B	2:58:00	2:26:00	3:08:00	2:09:00	0:32:00	0:59:00	30201	29930
	1.250		13C	13B	2:37:00	1:50:00	4:35:00	3:25:00	0:47:00	1:10:00	56828	63088

			Temps de simulation (hh:mm)								Zones non projetées	
Dimension (Tonnage)		Taille Echantillon	Identification		Matrice		Noyau		Différences		(mm ²)	
			Matrice	Noyau	Conventionnel	Durable	Conventionnel	Durable	Matrice	Noyau	Matrice	Noyau
]0,75 ; 2]	1.260	15										
	1.440		14C	14B	5:21:00	3:06:00	10:47:00	6:12:00	2:15:00	4:35:00	170244	187276
	1.450		15C	15B	2:17:00	1:26:00	6:52:00	4:27:00	0:51:00	2:25:00	87351	131127
	1.480		16C	16B	1:37:00	1:00:00	7:10:00	4:09:00	0:37:00	3:01:00	66024	150875
	1.650		18C	18B	6:20:00	3:50:00	9:20:00	5:20:00	2:30:00	4:00:00	144459	210411
	1.670											
	1.695											
	1.695		17C	17B	18:19:00	13:47:00	6:12:00	4:38:00	4:32:00	1:34:00	198148	201131
	1.740											
	1.750		19C	19B	5:48:00	3:33:00	7:48:00	4:29:00	2:15:00	3:19:00	145453	159936
	1.900		20C	20B	7:47:00	5:27:00	9:43:00	6:44:00	2:20:00	2:59:00	176589	63088
	1.905		21C	21B	1:33:00	0:54:00	5:43:00	3:35:00	0:39:00	2:08:00	43333	186797
]2 ; 5]	2.175	6										
	2.325		22C	22B	9:36:00	6:12:00	11:01:00	8:49:00	3:24:00	2:12:00	130938	166006
	2.920		23C	23B	74:09:00	69:35:00	111:33:00	105:10:00	4:34:00	6:23:00	394535	567709
	2.920		24C	24B	74:09:00	69:35:00	111:33:00	105:10:00	4:34:00	6:23:00	394535	567709
	3.000											
	3.300		25C	25B	5:35:00	4:16:00	6:37:00	4:13:00	1:19:00	2:24:00	63294	97104
	4.190											
	4.205		26C	26B	23:30:00	16:01:00	21:24:00	15:09:00	7:29:00	6:15:00	379527	362374
	4.470		27C	27B	19:45:00	12:30:00	6:27:00	3:48:00	7:15:00	2:39:00	176680	209732

				Temps de simulation (hh:mm)						Zone non projetées (mm ²)		
Dimension (Tonnage)		Taille Échantillon	Identification		Matrice		Noyau		Différences		Matrice Noyau	
			Matrice	Noyau	Conventionnel	Durable	Conventionnel	Durable	Matrice	Noyau		
]5 ; 10]	5.215	5										
	5.460		28C	28B	55:42:00	36:49:00	32:58:00	22:36:00	18:53:00	10:22:00	795560	807547
	5.485		29C	29B	32:46:00	20:58:00	41:26:00	26:21:00	11:48:00	15:05:00	790162	815576
	5.920		30C	30B	29:09:00	17:58:00	33:23:00	21:31:00	11:11:00	11:52:00	730770	442890
	7.050											
	7.970											
	8.765		31C	31B	64:41:00	45:42:00	38:29:00	26:46:00	18:59:00	11:43:00	1217278	720812
	9.055		32C	32B	5:31:00	3:18:00	25:40:00	14:43:00	2:13:00	10:57:00	449437	470262
]10 ; 20]	14.340	2	33C	33B	21:31:00	15:57:00	23:39:00	17:10:00	5:34:00	6:29:00	264456	368571
	15.000											
	15.000		34C	34B	45:02:00	26:55:00	39:10:00	23:25:00	18:07:00	15:45:00	1247391	1161015
]20 ; ∞[	21.900	2	35C	35B	48:46:00	41:19:00	69:39:00	42:13:00	7:27:00	27:26:00	1434334	1632046
	21.900											
	22.000		36C	36B	68:54:00	49:11:00	64:31:00	39:33:00	19:43:00	24:58:00	1047565	1641018
Somme		36			667:37:00	497:43:00	755:57:00	553:02:00	169:54:00	202:55:00		

Propre source résultante de l'étude

Annexe 2 – Economies en ressources humaines due à la simulation durable

Pièce		Qté pièces	Différences de temps de simulation (hh:mm)	Temps de simulation (hh)	Economie en homme/machine (€)
n°	type				
1	C	1	1:45	1,75	52,5
	B	1	6:09	6,15	184,5
2	C	1	0:32	0,53	15,9
	B	1	0:43	0,72	21,6
3	C	1	0:18	0,3	9
	B	1	0:21	0,35	10,5
4	C	1	1:56	1,93	57,9
	B	1	1:48	1,8	54
5	C	1	1:56	1,93	57,9
	B	1	1:48	1,8	54
6	C	1	0:14	0,23	6,9
	B	1	0:20	0,33	9,9
7	C	1	0:42	0,7	21
	B	1	1:49	1,82	54,6
8	C	1	0:49	0,82	24,6
	B	1	0:42	0,7	21
9	C	1	0:36	0,6	18
	B	1	0:29	0,48	14,4
10	C	1	0:32	0,53	15,9
	B	1	0:20	0,33	9,9
11	C	1	0:46	0,77	23,1
	B	1	1:23	1,38	41,4
12	C	1	0:32	0,53	15,9
	B	1	0:59	0,98	29,4
13	C	1	0:47	0,78	23,4
	B	1	1:10	1,17	35,1
14	C	1	2:15	2,25	67,5
	B	1	4:35	4,58	137,4
15	C	1	0:51	0,85	25,5
	B	1	2:25	2,42	72,6
16	C	1	0:37	0,62	18,6
	B	1	3:01	3,02	90,6
17	C	1	2:30	2,5	75
	B	1	4:00	4	120
18	C	1	4:32	4,53	135,9
	B	1	1:34	1,57	47,1
19	C	1	2:15	2,25	67,5
	B	1	3:19	3,32	99,6
20	C	1	2:20	2,33	69,9
	B	1	2:59	2,98	89,4

Pièce		Qté pièces	Différences de temps de simulation (hh:mm)	Temps de simulation (hh)	Economie en homme/machine (€)
n°	type				
21	C	1	0:39	0,65	19,5
	B	1	2:08	2,13	63,9
22	C	1	3:24	3,4	102
	B	1	2:12	2,2	66
23	C	1	4:34	4,57	137,1
	B	1	6:23	6,38	191,4
24	C	1	4:34	4,57	137,1
	B	1	6:23	6,38	191,4
25	C	1	1:19	1,32	39,6
	B	1	2:24	2,4	72
26	C	1	7:29	7,48	224,4
	B	1	6:15	6,25	187,5
27	C	1	7:15	7,25	217,5
	B	1	2:39	2,65	79,5
28	C	1	18:53	18,88	566,4
	B	1	10:22	10,37	311,1
29	C	1	11:48	11,8	354
	B	1	15:05	15,08	452,4
30	C	1	11:11	11,18	335,4
	B	1	11:52	11,87	356,1
31	C	1	18:59	18,98	569,4
	B	1	11:43	11,72	351,6
32	C	1	2:13	2,22	66,6
	B	1	10:57	10,95	328,5
33	C	1	5:34	5,57	167,1
	B	1	6:29	6,48	194,4
34	C	1	18:07	18,12	543,6
	B	1	15:45	15,75	472,5
35	C	1	7:27	7,45	223,5
	B	1	27:26	27,43	822,9
36	C	1	19:43	19,72	591,6
	B	1	24:58	24,97	749,1
TOTAL	C	36	169:54	169,89	11.184
	B	36	202:55	202,91	
		72	372:49	372,8	

Propre source résultante de l'étude

Annexe 3 – Economie énergétique et quantité de dioxyde de carbone (CO₂) non émis
pour l’atmosphère due à la simulation durable

Pièce		Qté pièces	Temps de simulation (hh)	Consommation moyenne des CNC's (kW)	Consommation moyenne dans la simulation (kWh)	Economie énergétique (€)	CO ₂ non émis pour l’atmosphère	
n°	type						(g)	(Kg)
1	C	1	1,75	49,33	86,3275	9,50	19573,9	19,57
	B	1	6,15		303,3795	33,37	68788,27	68,79
2	C	1	0,53		26,1449	2,88	5928,09	5,93
	B	1	0,72		35,5176	3,91	8053,26	8,05
3	C	1	0,3	49,33	14,799	1,63	3355,53	3,36
	B	1	0,35		17,2655	1,90	3914,78	3,91
4	C	1	1,93		95,2069	10,47	21587,21	21,59
	B	1	1,8		88,794	9,77	20133,15	20,13
5	C	1	1,93		95,2069	10,47	21587,21	21,59
	B	1	1,8		88,794	9,77	20133,15	20,13
6	C	1	0,23		11,3459	1,25	2572,57	2,57
	B	1	0,33		16,2789	1,79	3691,08	3,69
7	C	1	0,7	49,33	34,531	3,80	7829,56	7,83
	B	1	1,82		89,7806	9,88	20356,85	20,36
8	C	1	0,82		40,4506	4,45	9171,77	9,17
	B	1	0,7		34,531	3,80	7829,56	7,83
9	C	1	0,6		29,598	3,26	6711,05	6,71
	B	1	0,48		23,6784	2,60	5368,84	5,37
10	C	1	0,53		26,1449	2,88	5928,09	5,93
	B	1	0,33		16,2789	1,79	3691,08	3,69
11	C	1	0,77		37,9841	4,18	8612,51	8,61
	B	1	1,38		68,0754	7,49	15435,42	15,44
12	C	1	0,53		26,1449	2,88	5928,09	5,93
	B	1	0,98		48,3434	5,32	10961,38	10,96
13	C	1	0,78		38,4774	4,23	8724,37	8,72
	B	1	1,17		57,7161	6,35	13086,55	13,09
14	C	1	2,25		110,9925	12,21	25166,44	25,17
	B	1	4,58		225,9314	24,85	51227,69	51,23
15	C	1	0,85		41,9305	4,61	9507,32	9,51
	B	1	2,42		119,3786	13,13	27067,9	27,07
16	C	1	0,62		30,5846	3,36	6934,75	6,93
	B	1	3,02		148,9766	16,39	33778,95	33,78
17	C	1	2,5		123,325	13,57	27962,71	27,96
	B	1	4		197,32	21,71	44740,34	44,74
18	C	1	4,53		223,4649	24,58	50668,43	50,67
	B	1	1,57		77,4481	8,52	17560,58	17,56
19	C	1	2,25		110,9925	12,21	25166,44	25,17
	B	1	3,32		163,7756	18,02	37134,48	37,13
20	C	1	2,33		114,9389	12,64	26061,25	26,06
	B	1	2,98		147,0034	16,17	33331,55	33,33

Pièce		Qté pièces	Temps de simulation (hh)	Consommation moyenne des CNC's (kW)	Consommation moyenne dans la simulation (kWh)	Economie énergétique (€)	CO ₂ non émis pour l'atmosphère	
n°	type						(g)	(Kg)
21	C	1	0,65	49,33	32,0645	3,53	7270,3	7,27
	B	1	2,13		105,0729	11,56	23824,23	23,82
22	C	1	3,4	49,33	167,722	18,45	38029,29	38,03
	B	1	2,2		108,526	11,94	24607,19	24,61
23	C	1	4,57		225,4381	24,80	51115,83	51,12
	B	1	6,38		314,7254	34,62	71360,84	71,36
24	C	1	4,57		225,4381	24,80	51115,83	51,12
	B	1	6,38		314,7254	34,62	71360,84	71,36
25	C	1	1,32		65,1156	7,16	14764,31	14,76
	B	1	2,4		118,392	13,02	26844,2	26,84
26	C	1	7,48		368,9884	40,59	83664,43	83,66
	B	1	6,25		308,3125	33,91	69906,78	69,91
27	C	1	7,25		357,6425	39,34	81091,86	81,09
	B	1	2,65		130,7245	14,38	29640,47	29,64
28	C	1	18,88		931,3504	102,45	211174,39	211,17
	B	1	10,37		511,5521	56,27	115989,32	115,99
29	C	1	11,8		582,094	64,03	131983,99	131,98
	B	1	15,08		743,8964	81,83	168671,07	168,67
30	C	1	11,18		551,5094	60,67	125049,24	125,05
	B	1	11,87		585,5471	64,41	132766,95	132,77
31	C	1	18,98		936,2834	102,99	212292,9	212,29
	B	1	11,72		578,1476	63,60	131089,19	131,09
32	C	1	2,22		109,5126	12,05	24830,89	24,83
	B	1	10,95		540,1635	59,42	122476,67	122,48
33	C	1	5,57	49,33	274,7681	30,22	62300,92	62,3
	B	1	6,48		319,6584	35,16	72479,35	72,48
34	C	1	18,12		893,8596	98,32	202673,73	202,67
	B	1	15,75		776,9475	85,46	176165,08	176,17
35	C	1	7,45	49,33	367,5085	40,43	83328,88	83,33
	B	1	27,43		1353,1219	148,84	306806,86	306,81
36	C	1	19,72		972,7876	107,01	220569,86	220,57
	B	1	24,97		1231,7701	135,49	279291,55	279,29
Total	C	36	169,89	---	18.390,22	2.022,92	4.169.799,4	4.169,79
	B	36	202,91					
		72	372,8					

Propre source résultante de l'étude